

Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет імені  
Юрія Федьковича

# **МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Навчальний посібник для студентів спеціальності 186,  
Видавництво та поліграфія  
(Електронне видання)

*Рекомендовано Вченою радою ІФТКН  
Протокол №1 від 29.08.2023*

Чернівці  
Чернівецький національний університет  
2023

**Н54 Навчально-методичний посібник «Методи наукових досліджень» / укл. Ушенко О.Г., Дуболазов О.В.- Чернівці: Чернівецький нац. унт, 2023. — 142 с.**

Викладено матеріал який, передбачає поглиблене вивчення наукових підходів, аналізу задач і синтезу науково-технічних рішень.

Для студентів технічних факультетів за спеціальністю «Видавництво та поліграфія»

© Чернівецький

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
Розділ 1 НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИВЧЕННЯ І УДОСКОНАЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ	7
1.1. Види науково-технічного дослідження і їхня сутність	7
1.2. Загальне поняття про методи наукового дослідження і	11
1.3. Методи емпіричного і теоретичного дослідження	14
1.4. Методологічні підходи в науковому дослідженні	31
Питання для самостійного контролю.	40
ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВИРОБІВ	42
2.1. Основні етапи процесу рішення проектних задач і їхнє	42
2.2. Постановка задачі	49
2.3. Аналіз технічної задачі	52
2.4. Формулювання умов задач, пошук ідеї рішення	56
2.5. Синтез нового технічного рішення	65
Питання для самостійного контролю.	67
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПОШУКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	69
3.1. Загальні поняття про методи пошуку	69
3.2. Асоціативні методи пошуку	72

3.3. Методи контрольних питань	75
3.4. Мозковий штурм. Синектика	80
3.5. Морфологічний аналіз	84
3.6. Узагальнений евристичний метод	88
3.7. Інші методи пошуку технічних рішень	96
Питання для самостійного контролю	102
<b>РОЗДІЛ 4 МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ</b>	<b>104</b>
<b>ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ</b>	<b>104</b>
4.1. Загальні відомості щодо інтегрованих систем	104
4.2 Методи рішення інженерних задач на етапі	110
<b>4.2.1 Основи методу скінчених елементів</b>	<b>110</b>
4.2.2. Методи оптимізації в інженерному аналізі	120
4.3. Можливості виконання інженерних задач із	133
4.3.1. Призначення пакета	133
4.3.2. Теоретична база	134
4.3.3. Інтерфейс	137
Питання для самостійного контролю.	152
<i>Список літератури</i>	152

## ПЕРЕДМОВА

Одним з основних недоліків освіти багатьох випускників інженерних спеціальностей є те, що вони не можуть самостійно ставити нові завдання і вирішувати проблему пошуку нових конструкторсько-технічних рішень, що в кінцевому підсумку дозволить підвищити якість технічної продукції, вийти на конкурентоспроможний рівень, і в цілому розвиватися і економити ресурси. Навчальний процес орієнтований на розв'язання таких теоретичних і практичних задач, де наведені формулювання, способи розв'язання та приклади розв'язання цими способами, а викладач (як правило, студент) знає відповіді. При цьому розв'язування задач, як правило, є рутинним завданням, яке не потребує творчих ідей. Окрім набуття навичок розв'язування таких задач, майбутні фахівці повинні також набути знань і вмінь розв'язувати творчі технічні задачі, де немає попереднього формулювання, розв'язок невідомий, немає знайомих прикладів розв'язання подібних задач, викладач не знає відповіді, а варіантів розв'язання, як правило, є декілька.

Процес формування технічних кадрів повинен бути підпорядкований розвитку таких навичок, як самостійна технічна творчість, системний аналіз техніко-економічних проблем і вміння знаходити ефективні рішення.

Дисципліна "методи наукових дослідження" покликана реалізувати творчий потенціал інженерно-технічних і наукових кадрів і відіграти важливу роль у реорганізації та підвищенні ефективності їхньої роботи. По-перше, збільшити частку студентів, які проявляють ентузіазм і самостійність у своїх дослідженнях і, таким чином, розвивають позитивне ставлення і творчий потенціал, що має

вирішальне значення для молодих фахівців. По-друге, збільшити частку курсових і дипломних проектів, що передбачають креативні інженерні рішення. По-третє, збільшити кількість інтелектуальної продукції кафедри у вигляді авторських свідоцтв, свідоцтв і патентів на винаходи викладачів і студентів, а також пропозицій щодо нових конструкцій і технічних рішень, які були реально розроблені і впроваджені.

## **Розділ 1 ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВИДАВНИЦТВІ ТА ПОЛІГРАФІЇ**

У цьому розділі узагальнено концепції, що стосуються методології, різних типів та методів наукового дослідження, які можуть бути використані для вивчення та удосконалення поліграфічної продукції на всіх етапах її життєвого циклу, включаючи проектування. З метою кращого розуміння конкретних методів, які застосовуються при розробці продукції (детально розглянуті в наступних розділах), пропонується загальна класифікація дослідницьких методів, охоплюючи їхні види і методологічні підходи у науково-технічному вивченні.

### **1.1. Актуалізація знань про сучасні тенденції та вимоги ринку друкованої продукції**

Для прогресу у науковому пізнанні характерно не лише розширення кількості теоретичних і практичних завдань, але також посилення уваги до методів та способів науково-технічної діяльності. Одержання необхідного результату напряму залежить від вихідної теоретичної позиції, принципового підходу до постановки завдань та визначення шляхів дослідницького пошуку.

Науково-технічне дослідження включає дві основні стадії пізнання: теоретичну та емпіричну. Теоретичний етап характеризується широким використанням абстрагування, ідеалізації, формуванням понять, створенням гіпотез, моделей та теорій.

Емпіричне дослідження базується на спостереженнях, експериментах і ґрунтується на даних досвіду.

Іноді теорію порівнюють з емпірією, але таке протиставлення не є обґрунтованим, оскільки теоретичні передбачення мають такий же ймовірнісний характер, як і ті, що ґрунтуються на емпіричних узагальненнях. Кінцевою метою пізнання є не лише створення окремих понять, гіпотез чи відкриття ізольованих законів, але й побудова єдиної концептуальної системи, яка забезпечує більш адекватне й цілісне відображення певної області реальності.

Розвиток будь-якої науки значно залежить не лише від застосування ефективних методів дослідження, але й від різноманітності видів дослідження. На сьогоднішній день не існує чітко визначеної класифікації видів і методів наукового дослідження, тому наведемо загальну концепцію щодо їх класифікації.

Почнемо з виділення типів наукових досліджень. За масштабом розв'язуваних проблем і цілей виділяють фундаментальні та прикладні дослідження. Фундаментальні дослідження мають на меті розкрити й описати нові, невідомі явища й процеси в природі і суспільстві, вивчити їхній механізм і закони, що їх керують, розкрити глибинні зв'язки між ними. Прикладні дослідження спрямовані на реалізацію результатів фундаментальних досліджень у практичній діяльності, вирішують вузькоспеціалізовані теоретичні й практичні завдання.

Фундаментальні дослідження поділяються на пошукові (вільні) та тематичні (цільові). Пошукові дослідження стосуються великої, але мало дослідженої проблеми, тоді як тематичні фундаментальні дослідження мають на меті розв'язання конкретної, більш вузької проблеми.

Прикладні дослідження поділяються на телонічні (цільові) та тематичні (суб'єктивні). Телонічні дослідження спрямовані на досягнення конкретної мети, включаючи багато наукових галузей, тоді як тематичні призначені для вирішення більш вузької проблеми.



У методології наукового дослідження вирізняють різні типи досліджень, такі як емпіричне, експериментальне, теоретичне та комплексне дослідження. Важливо враховувати різницю між філософським поняттям "досвід" і "досвідом", який є близьким до експерименту. У вузькому розумінні, досвід передбачає активне освоєння та використання вже відомих законів, принципів та теорій у практиці, тоді як експеримент є загальнонауковим методом, спрямованим на організоване вивчення об'єкта для систематичного набуття знань.

Факти є необхідною складовою в будь-якій науці, проте, щоб вони увійшли в наукову теорію як докази, потрібно їх теоретично осмислити та обробити. Це включає в себе відбір, класифікацію, аналіз, порівняння, узагальнення та пояснення. Теоретичне осмислення дозволяє встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між явищами та розуміти закономірності в досліджуваній області.

Для теоретичного осмислення досліджуваного явища введено абстрактні поняття, формулюють гіпотези, відкривають закони та будують наукові теорії, які розкривають внутрішні механізми протікання явищ. Феноменологічні теорії описують та систематизують накопичений емпіричний матеріал, встановлюючи логічні зв'язки між його елементами. У відміну від них, пояснювальні теорії розкривають сутність спостережуваних явищ.

Також можна виділити пролонговане дослідження, яке передбачає тривале та систематичне вивчення об'єкта, особистості чи явища з метою прогнозування його подальшого розвитку

Отже, після розгляду різних видів наукового дослідження, можна переходити до визначення поняття "метод дослідження".

## **1.2. Загальне поняття про методи наукового дослідження і їхня класифікація**

Філософський словник визначає поняття "метод" як спосіб досягнення певної мети, сукупність прийомів або завдань для практичного чи теоретичного вивчення дійсності. Метод - це спосіб пізнання, який дослідник здійснює над предметом, керуючись певною гіпотезою.

Існують різні визначення терміну "метод дослідження": На думку Г.І. Рузавіна [24, 25], метод дослідження - це спеціальна процедура в науці, що складається з певних дій або операцій, за допомогою яких отримується і доводиться нове знання.

Існує декілька підходів до класифікації методів дослідження  
За рівнем пізнання: емпіричні та теоретичні.

За точністю припущень: детерміновані, ймовірнісні та ймовірнісно-статистичні.

За функцією у пізнанні: систематичні, пояснювальні та прогностичні.

За галуззю дослідження: фізичні, біологічні, соціальні, технологічні, інші.

Загальнонаукові методи дослідження можна поділити на три групи: емпіричні (спостереження, порівняння, вимірювання), теоретичні (сходження від абстрактного до конкретного, ідеалізація, уявний експеримент, формалізація) та загальнонаукові (абстрагування і конкретизація, аналіз, синтез, індукція, дедукція, абстрагування, моделювання, аналогія, історичний та логічний методи, графічні методи), які використовуються як на емпіричному, так і на теоретичному рівні.

Спеціальні методи включають морфологічний аналіз, синектику, Монте-Карло, метод найменших квадратів, методи тестування та трасування.

Важливо зазначити, що пошук (в літературі, досвіді, документації тощо) не є методом дослідження, а лише етапом дослідження. Каліметричні методи також активно використовуються в технічних дослідженнях для вимірювання якості предметів, що входять в область каліметрії.

Таким чином, методи дослідження включають в себе різні підходи і процедури, що використовуються в науці для отримання і демонстрації нових знань.

### **1.3. Методи емпіричного і теоретичного дослідження**

#### **1.3.1. Методи емпіричного дослідження**

Спостереження є навмисним і цілеспрямованим сприйняттям зовнішнього світу з метою вивчення і відшукування смислу в явищах. Це елементарний метод, який часто виступає як складова частина більш складних емпіричних методів. Однак його можливості обмежені, оскільки він дозволяє виявити лише зовнішні ознаки та прояви фактів, залишаючи внутрішні процеси недоступними для спостереження.

Порівняння є одним із найпоширеніших методів пізнання і дослідження. Воно дозволяє визначити подібність і відмінність між об'єктами, явищами, теоріями, виявляючи те спільне, що властиво двом або більше об'єктам. Порівняння визначається певними вимогами, такими як наявність об'єктивної спільності між порівнюваними об'єктами та використання найбільш важливих істотних ознак.

Експеримент, як планомірно проведене спостереження, полягає в планомірній ізоляції, комбінації і варіюванні умов з метою вивчення залежних від них явищ. Він може бути природним

(проводиться в природних умовах) або лабораторним (проводиться в спеціально створених дослідних умовах). Організація експерименту включає стадії висунення гіпотези, постановки завдань, підготовки матеріальної бази, розробки необхідного матеріалу, вибору оптимального шляху, спостереження, фіксації, опису явищ та аналізу отриманих результатів.

В експерименті можна виділити такі види за місцем проведення, часом тривалості та метою (спрямованістю) експерименту, такі як експеримент для констатації та експеримент для формування.

Зазначено, що у науково-технічному дослідженні експеримент і теорія тісно пов'язані, і науково поставлений експеримент може бути здійснений лише при наявності теорії або теоретичної основи.

Це підкреслює важливість взаємодії теоретичних та емпіричних аспектів у науковому дослідженні, де теорія слугує основою для наукового експерименту, який, у свою чергу, підтверджує чи спростовує гіпотези та дає підставу для узагальнення та пояснення отриманих результатів.

### 1.3.2. Методи теоретичного дослідження

Нагадаємо, що до методів теоретичного дослідження відносять метод сходження від абстрактного до конкретного, формалізацію, ідеалізацію, та аксіоматичний метод. Для теоретичного дослідження також використовуються інші загальні методи, які є застосовними як для емпіричного, так і для теоретичного дослідження. У цьому підрозділі розглянемо методи теоретичного рівня дослідження.

Метод сходження від абстрактного до конкретного передбачає осмислення основних понять: "абстрактне", "абстрагування",

"абстракція" та "конкретне". Термін "абстрактне" використовується для характеристики людського знання, позначаючи однобічне та неповне знання, яке не розкриває сутності предмета в цілому. Абстрагування визначається як відділення та виокремлення однієї істотної сторони, властивості чи ознаки явища або предмета, відволікаючи від інших сторін та властивостей.

Результатом абстрагування є абстракція, яку вважають вищим шаблоном у розвитку людського знання. Абстракція може набувати різних форм, таких як чуттєво-наочний образ, ідеалізований об'єкт, судження, абстрактне поняття, категорія чи закон. Термін "конкретне" використовується для позначення самої дійсності та для позначення всебічного, деталізованого систематичного знання про об'єкт.

Таким чином, сходження від абстрактного до конкретного є загальною формою руху наукового пізнання та законом відображення дійсності в мисленні. Процес пізнання включає два етапи: спочатку сходження від абстрактного до конкретного, що передбачає перехід від споглядання конкретного в дійсності до його абстрактних визначень, і потім сходження від абстрактного до конкретного в мисленні, рухаючись від абстрактних визначень об'єкта до конкретного в пізнанні.

Метод формалізації, пов'язаний з поняттям абстрагування, використовується для представлення різноманітних об'єктів у знаковій формі. Формалізація використовує "штучні" мови, такі як мова математики, математична логіка, хімія та інші, для відображення структури та змісту об'єктів. Цей метод дослідження має переваги, такі як повнота огляду області проблем, використання спеціальної символіки для чіткої фіксації знань, уникнення багатозначності

термінів, та формування знакових моделей об'єктів, що заміщають вивчення реальних речей та процесів.

Формалізація, як метод дослідження, володіє рядом переваг, серед яких:

Забезпечення повноти області проблем та узагальненість підходу до їх вирішення.

Базується на використанні спеціальної символіки для стислості і чіткості фіксації знань.

Пов'язана з приписуванням окремим символам чи їх системам певних значень, що уникає багатозначності термінів.

Дозволяє формувати знакові моделі об'єктів, замінюючи вивчення реальних речей і процесів вивченням цих моделей.

Формалізація є невід'ємною частиною формальної логіки. Наприклад, у евклідовій геометрії вона проявляється через невелике число незалежно введених понять і символів, таких як число, пряма, точка, і основних правил їх комбінування.

Ідеалізація, як метод теоретичного дослідження, визначається як уявне конструювання об'єктів, що подумки конструюються, називаються ідеальними об'єктами. Вони мають абстрактну модель і об'єднують невелике число загальних властивостей та просту структуру. Ідеальні об'єкти, такі як абсолютно тверде тіло чи електричний заряд, існують лише уяві дослідника, не маючи фізичної реалізації.

Уявний експеримент із ідеалізованими об'єктами є одним з методів теоретичного дослідження. Він передбачає систему логічних операцій для розкриття змісту, визначення взаємозв'язків та виявлення закономірностей руху. Цей метод має однакову мету з реальним експериментом - вивчення перетворень об'єкта залежно від умов.

Аксиоматичний метод є поширеним у науковому пізнанні, особливо в математичних науках. Він передбачає прийняття ряду тверджень без доказів, які називаються аксіомами, та виведення інших знань із них за логічними правилами. Аксіоми та первинні поняття утворюють базу теорії.

Аксиоматизація наукових теорій має велику пізнавальну цінність, забезпечуючи строгість, несуперечність, повноту та незалежність аксіоматизованої системи. Це дозволяє ефективно вирішувати проблеми істинності положень теорії та визначати їх довідність.

### 1.3.3. Загальнонаукові методи дослідження

Загальнонаукові методи, що використовуються як в емпіричних, так і в теоретичних дослідженнях, включають абстрагування, аналіз, синтез, аналогію, індукцію, дедукцію, абстрагування, моделювання, історичний та логічний методи, а також графічні методи. Пояснимо їх коротко.

**Абстрагування:** Суть цього методу полягає у творчому відході від несуттєвих рис, ознак, зв'язків і відносин досліджуваного об'єкта або явища, при цьому виділяючи і фіксуючи один або кілька істотних (цікавих для дослідника) аспектів або ознак предмета.

**Абстрагування:** Це результат абстрагування та пізнання певного аспекту об'єкта. Процес абстрагування включає низку розумових операцій, що призводять до абстрагування.

Прикладами абстракції є "дерево", "будинок", "дорога", "рідина" та багато інших понять, що використовуються як у науці, так і в повсякденному житті.

Основні функції абстракції наступні.

- Вона може замінити складне у сприйнятті простим;
- Допомагає розібратися в нескінченному розмаїтті реальності, виділити різні її аспекти та особливості, встановити зв'язки та відношення між цими аспектами і зафіксувати їх у процесі сприйняття.

Існує чотири рівні (стадії) абстрагування отриманої інформації: феноменологічний (описовий), аналітико-синтетичний, прогностичний та аксіологічний. Ці рівні абстрагування є показниками науковості знання.

Процес абстрагування тісно пов'язаний з іншими методами дослідження, особливо з аналізом і синтезом.

Аналіз і синтез. Аналіз передбачає розкладання цілого на складові, тобто виділення характеристик об'єкта та їх окреме вивчення як частин єдиного цілого. Строгий аналіз серйозно гарантує логічний виклад матеріалу дослідження (дисертації, монографії).

Аналіз гіпотез здійснюється дедуктивно. Дедуктивні передумови дозволяють розробити версію з причинно-наслідковим ланцюжком, що пояснює результати. Це важливо для дисертаційного дослідження, оскільки дозволяє досліднику розробити версію причинно-наслідкового ланцюжка, що пояснює результати. Гіпотетична версія є обґрунтованою, якщо її передумови містять реалістичні ідеї з альтернатив, одна з яких містить факт. Якщо факти самі по собі не дають жодного уявлення про причину явища, необхідно розробити гіпотезу. Отже, гіпотезу потрібно спочатку розробити та проаналізувати.

Для дослідників-початківців можна рекомендувати наступний алгоритм аналізу:

- розділити об'єкт або явище на складові частини та виявити взаємозв'язки між цими частинами;
- визначити ознаки та властивості об'єкту;



- визначити схожість і відмінність цих ознак;
- розташувати об'єкти поодиноці або за декількома ознаками в послідовності убування або зростання цих ознак;
- співвіднести загальне із приватним, одиничним, особливим.
- Цей алгоритм аналізу нагадує алгоритм порівняння через тісний зв'язок між аналізом і порівнянням. Давайте розглянемо різницю між "ознакою" і "властивістю". Ознаками вважаються риси схожості або відмінності предметів, тобто показники, прикмети, знаки, за якими можна визначити або впізнати що-небудь. З іншого боку, властивість це якість, характерна особливість чого-небудь.

Щодо синтезу, аналіз і синтез виступають як результативні методи пізнання тільки тоді, коли вони використовуються у тісному зв'язку. Щоб аналіз став можливим для певної речі, вона повинна бути зафіксована в нашій свідомості як цілісне, систематично сприйняте ціле. З іншого боку, синтез можливий тоді, коли проведено аналіз, виділено різні сторони та елементи цілого. Отже, синтез представляє собою об'єднання виокремлених при аналізі частин у єдине ціле.

В науковій творчості методи аналізу та синтезу приймають різні форми, що залежать від глибини пізнання об'єкта. Три основні види цих методів включають:

*Прямий або емпіричний* аналіз і синтез: Використовується на початковому етапі, коли необхідно отримати поверхневе ознайомлення з об'єктом. Здійснюється виокремлення частин об'єкта, виявлення його властивостей, проведення простих вимірювань та фіксація поверхневих даних.

*Зворотний або елементарно-теоретичний* аналіз і синтез: Використовується для розкриття сутності явища, ґрунтуючись на теоретичних міркуваннях та припущеннях про причинно-наслідковий зв'язок різних явищ та закономірностей.

*Структурно-генетичний* аналіз і синтез: Дозволяє глибоко проникнути в сутність об'єкта, виокремлюючи головні елементи, які мають вирішальний вплив на інші сторони сутності. Цей вид аналізу та синтезу вимагає виокремлення ключових компонентів, "клітинок" або "ядра", які визначають вирішальний вплив на об'єкт.

Поняття аналогії використовується для визначення подібності, відповідності чи подібних рис предметів та явищ. Аналогія виступає одним із активних методів дослідження, особливо на початкових етапах пізнання, маючи пізнавальне значення у встановленні схожостей та відповідностей між об'єктами.

Першим кроком у формулюванні висновків за аналогією є порівняння. Порівняння дозволяє визначити природу подібностей і відмінностей між об'єктами.

Наука зробила багато відкриттів і технічних винаходів на основі аналогії. Наприклад, схожість між явищами електричної машини і блискавки привела Франкліна до винаходу громовідводу. Хіміки створили тисячі речовин за аналогією з природними сполуками.

Аналогії слугують засобом викладу думок, суть якого полягає у знаходженні невідомих властивостей на основі попередніх знань про інший подібний об'єкт чи явище. Аналогія - це перенесення знань з одного об'єкта на інший на основі певних зв'язків між ними.

Існують різні типи аналогій, в залежності від характеру перенесення інформації:

*Каузальна аналогія:* Порівнюються явища, породжені однаковими причинами.

*Функціонально-структурна аналогія:* Системи ототожнюються на основі тотожності їхніх функцій.

*Структурно-функціональна аналогія:* Функції ототожнюються на основі тотожності структури.

Висновки, які робляться за допомогою аналогії, мають імовірнісний характер, оскільки імовірне знання може мати різні градації, від малоімовірного до достовірного.

Ймовірність зробити висновок за аналогією залежить від кількості схожих ознак, що враховуються в порівнюваних явищах, і ступеня важливості цих ознак. Важливо мати на увазі, що чим більша схожість порівнюваних об'єктів, тим менша інтуїтивна цінність аналогії.

Слід також мати на увазі, що надто віддалені аналогії можуть ввести в оману, а надто "точні" - втратити сенс. Наприклад, теорія моделювання вважає, що занадто віддалені моделі можуть вводити в оману, а занадто "точні" моделі можуть втратити сенс і стати марними.

Крім того, до методу аналогії можна віднести інший метод - екстраполяцію, яка полягає в поширенні висновків, отриманих зі спостережень над однією частиною явища, на іншу його частину.

Індукція та дедукція, хоч і рідко визначаються як методи дослідження в дисертаційних роботах, вважаються звичайними видами висновку. Індукція визначається як метод міркування від конкретних суджень до загальних висновків, заснований на вивченні окремих фактів та явищ. Цей метод розпочинається з нагромадження знань про якнайбільше схожих предметів та явищ, а подальше узагальнення подібних фактів дозволяє робити висновки щодо всього класу. Наприклад, розглядаючи провідні властивості металів, можна здійснити індуктивний висновок, що всі метали є електропровідними.

Дедукція, з іншого боку, є методом міркування від загальних висновків до конкретних, оснований на знанні загальних законів і правил. Такий метод надає можливість висновку фактів та явищ на підставі існуючих теоретичних знань. Наприклад, якщо відомо, що всі

метали є електропровідними, а залізо є металом, можна дедуктивно вивести, що залізо також є електропровідним.

Різниця між індукцією та дедукцією полягає в напрямку міркувань. Індукція, узагальнюючи емпіричний матеріал, готує ґрунт для висування припущень щодо причин явищ. З іншого боку, дедукція, теоретично обґрунтовуючи індуктивні висновки, зменшує їх гіпотетичний характер і перетворює в достовірне знання.

Також важливо розрізнити між повною та неповною індукцією. Повна індукція включає розгляд кожного випадку в межах класу явищ і базується на вивченні типових випадків. З іншого боку, неповна індукція виходить з розгляду лише деяких предметів класу, але аналізує їх суттєві ознаки та зв'язки. Неповна індукція, хоча і широко використовується, не надає достовірних висновків.

Дедукція вважається найшвидшим способом досягнення пізнання, що робить її визначним методом. Структура дедукції включає три судження: загальне положення, що називається великою посилкою; зв'язане з ним судження, яке призводить до його застосування і відоме як малою посилкою; висновок. Абдукція, у свою чергу, є методом міркування від наявних даних до гіпотези, яка пояснює або оцінює їх краще, ніж альтернативні гіпотези.

На перший погляд може здатися, що абдукція мало відрізняється від індукції, оскільки обидва методи призводять до гіпотези. Але це лише формальна схожість. Індукція просто перераховує факти, що мають загальну ознаку, не пояснюючи їх. У відмінну від цього, абдуктивне міркування використовується для пояснення фактів шляхом розгляду їх як взаємозалежну систему, в якій намагаються знайти пояснення за допомогою гіпотези.

Використання абдукції в науці вважається більш складним, оскільки вона може включати як емпіричні факти, так і їхні узагальнення та гіпотези. Рівень пояснення фактів зростає з переходом від емпіричних гіпотез до теоретичних. Абдукція виявляється як основний метод пошуку пояснювальних гіпотез, в якому виявлення нових фактів змушує робити обґрунтовані припущення або гіпотези для їх пояснення.

Відзначаючи дедукцію і індукцію як спільні методи в абдуктивному висновку, де дедукція виводить наслідки з гіпотези, а індукція підтверджує або спростовує цю гіпотезу, стає очевидним, що абдукція є процесом, в ході якого модифікують і коригують гіпотези. Моделювання, з іншого боку, представляє собою універсальний метод наукового пізнання, що передбачає вивчення об'єкта через його модель, яка відтворює деякі його аспекти за інтересуючими вченого сторонами.

*Модель* (від лат. "*modulus*" - зразок): 1) екземпляр; 2) відтворення предмета в зменшеному або збільшеному розмірі; 3) предмет винаходу в мистецтві, натурщик чи натурниця, що позує перед художником; 4) у ливарній справі - зразок предмета, який планують відлити; 5) геометричний малюнок, що надає наглядне уявлення про фізичний об'єкт або процес.

У процесі пізнання модель виконує роль джерела інформації про оригінал і служить засобом її фіксації. Однак сутність моделі не полягає в її точній подібності до оригіналу. Моделі - це аналоги, які суттєво подібні до оригіналу, але відмінності не суттєві залежно від умов конкретної пізнавальної задачі.

Наукова модель - це уявна або матеріально реалізована система, яка адекватно відображає об'єкт дослідження і може замінити його в тій мірі, в якій нова інформація про об'єкт може бути отримана шляхом вивчення моделі.

Модельне дослідження складається з таких етапів: визначення теми, створення або вибір моделі, вивчення моделі та перенесення знань з моделі на оригінал.

Моделі можуть бути використані для вивчення будь-якої теми, але через свої фундаментальні недоліки вони не можуть надати повну інформацію про тему-оригінал. Методи моделювання можуть бути ефективними лише в поєднанні з іншими пізнавальними методами або при безпосередньому вивченні оригіналу.

Основна перевага моделювання полягає в повноті представленої інформації. Моделювання має три цілі: евристичну (класифікація, ідентифікація, відкриття нових законів, побудова теорій, інтерпретація даних), обчислювальну (розв'язання обчислювальних задач за допомогою моделей) та експериментальну (перевірка гіпотез шляхом маніпулювання різними моделями).

Сучасне моделювання має ширший спектр форм: схеми, малюнки, прості описи, математичні формули, матриці, символи та графіки.

Історичний і логічний методи наукового пізнання застосовуються лише там, де предметом дослідження є історія об'єкта. Логічний метод пов'язаний з історичним і визначається як метод відтворення, реконструкції в мисленні складного об'єкта, що розвивається, у формі історичної теорії, використовуючи найрізноманітніші пізнавальні операції та методи.

#### **1.4. Методологічні підходи в науковому дослідженні**

Розглянемо більш детально два методологічні підходи, які є найбільш актуальними для науково-технічних досліджень: системно-структурний і синергетичний підхід. Останнім часом ці методології

стали об'єктом теоретичного аналізу вітчизняних та закордонних вчених.

#### 1.4.1. Системно-структурний підхід

У сучасних умовах у науці і практиці все частіше використовується системний підхід. Він базується на дослідженнях загальної теорії систем, які були проведені ще на початку ХХ століття вченими, такими як А.І. Берг, Л. Бергаланфі, Н. Вінер, К. Боулдінг та інші. Ці дослідження стали науковою основою для робіт у галузі біологічних, соціально-політичних, технічних та інших наук. Крім того, завдяки їм термін "системний підхід", який на сьогодні є широко використовуваним, увійшов у науковий обіг.

Системний підхід є важливим механізмом, який сприяє інтеграції наукових знань.

Існують різні визначення поняття "система":

- Сукупність взаємодіючих елементів (комплекс) (Л. Бергаланфі);
- сукупність (комплекс) взаємодіючих елементів (Л. Бергаланфі); сукупність елементів, в якій існує зв'язок між об'єктами та їх властивостями (А. Холл та ін.)
- Сукупність матеріальних або ідеальних об'єктів, взаємозв'язок і взаємодія яких уможливорює виникнення нових інтегрованих властивостей, відсутніх у компонентів системи (В.Г. Афанасьєв).

Структура системи - це зв'язки і взаємодії між її компонентами, і саме завдяки цим зв'язкам і взаємодіям з'являються нові інтегральні властивості системи, які відсутні у її компонентів. Щоб підкреслити відмінність нових властивостей від властивостей елементів, вчені називають їх емерджентними (емерджентність - це якість або властивість системи, яка не притаманна кожному з її

елементів, а є результатом об'єднання цих елементів в єдину цілісну систему).

Кожна система в реальному світі взаємодіє з навколишнім середовищем. Середовище - це предмети, явища, події тощо, які мають певний вплив на процеси, що відбуваються в ній.

У будь-якій науці існують системи і структури як окремих понять, так і теорій. Структурними елементами теорії є поняття, закони, узагальнення, гіпотези та факти. Структура теорії - це логічний зв'язок, який існує між її поняттями і судженнями.

Природа, структура і властивості системи можуть бути виражені наступним чином

Природа і сутність системи: природна чи штучна, замкнена чи відкрита, абстрактна (наприклад, поняття) конкретна (щонайменше два складові об'єкти), статична (властивості, які не змінюються з часом) динамічна, некерована чи централізована, адитивна (закономірність, порядок чогось) активна (взаємодія щонайменше двох складових);

цілі системи: цілі та засоби (чого вона намагається досягти); проблеми, які необхідно вирішити (що вона долає або усуває); функції (що вона хоче робити); функціонування, розвиток і самовдосконалення (як вона повинна діяти і змінюватися);

структура (організація) системи: об'єкти (суб'єкти), частини або компоненти, атрибути (властивості компонентів), зв'язки або взаємодії (що пов'язують систему в єдине ціле), наявність двох або більше типів зв'язку (прямого і зворотного), наявність ієрархічних рівнів і ступенів ієрархії;

властивості систем (характеристики, основні властивості): цілісність (завершеність і взаємозалежність), сумісність або несумісність з іншими системами, стійкість (стабільність зворотного зв'язку), адаптивність (приспособлення до середовища, реакція на



середовище та його вплив), здатність до навчання, розвитку, еволюція (мінливість у часі).

Сучасні природничі науки розрізняють прості та складні системи. Прості системи містять невелику кількість змінних (елементів), зв'язки між якими можна розглядати математично і встановлювати універсальні закони. Складні системи складаються з великої кількості змінних (елементів) і, відповідно, мають велику кількість зв'язків між ними. Зі збільшенням кількості зв'язків стає складніше досягти кінцевого результату, тобто встановити закономірності у функціонуванні об'єкта.

Складність вивчення складних систем пов'язана з тим, що чим складніша система, тим більше в ній емерджентних властивостей. Емерджентні властивості є проявами ефектів всієї сукупності системи і не існують в окремих частинах. Такі складні системи вивчає, наприклад, метеорологія, яка досліджує кліматичні процеси.

Поділ систем на прості та складні є фундаментальним для природничих наук. Серед складних систем найбільший інтерес викликають системи зі зворотним зв'язком. Деякі вчені вважають за необхідне розрізняти адитивні та активні системи (В.П. Симонов). Адитивна система - це система, в якій щось упорядковано в певному порядку. У такій системі ні система в цілому, ні її компоненти не зазнають істотних змін при додаванні або видаленні окремих елементів. Прикладами таких систем є систематичні книжкові каталоги, словники та довідники.

Активна система - це система, сутність якої характеризується сукупністю об'єктів, взаємодія яких призводить до виникнення нових інтегративних якостей, не притаманних окремим компонентам, що складають систему.

Система вважається відкритою, якщо вона обмінюється речовиною, енергією та інформацією з навколишнім середовищем; і

навпаки, вона вважається закритою, якщо вона не отримує і не випромінює енергію в будь-якій формі - інформації, тепла або фізичної речовини - і таким чином її компоненти не змінюються.

Усі природні системи вважаються закритими. Штучні, навпаки, є відкритими. Це означає, що в них також діють суб'єктивні закони, принципи і правила, створені людиною.

Тому основними принципами системного підходу до дослідження є наступні

Підхід до всієї проблеми, що аналізується, і, як наслідок, розуміння системи та її базового оточення;

Поняття системи визначається через поняття "зв'язки". Серед різних типів зв'язків особливе місце займають саме зв'язки, з яких складається система;

Стійкі зв'язки утворюють структуру системи, тобто гарантують її впорядкованість. Спрямованість цієї впорядкованості характеризує організацію системи;

Вертикальна структура передбачає визначення різних рівнів системи та існування ієрархії цих рівнів;

Зв'язки між різними рівнями забезпечуються за допомогою контролю.

#### 1.4.2. Синергетичний підхід

Поняття "синергетика" було введено в науковий обіг німецьким фізиком Г. Хакеном, а самостійна наука синергетика виникла в 70-х роках 20 століття. Важливий внесок у розвиток синергетики зробив бельгійський вчений І. Пригожи.

Він першим створив і продемонстрував науковий апарат для доведення можливості процесів самоорганізації у фізично нестабільних системах шляхом вивчення цих процесів у неживих і живих організмах. Подальші дослідження в галузі хімії та біології

підтвердили справедливість припущення вченого і дозволили йому сформулювати принцип, згідно з яким процеси, що відбуваються, можуть самоорганізовуватися.

В останні роки синергетика вийшла за межі однієї науки і стала предметом міждисциплінарних досліджень. Вона спрямована на розкриття універсальних механізмів самоорганізації складних систем, у тому числі когнітивних (пов'язаних зі свідомістю та мисленням). Сьогодні концепція синергетичного сприйняття світу цікавить науковців з різних галузей знань, включаючи філософію, фізику, хімію, біологію та психологію.

Розглянемо особливості синергетичного підходу. Якщо коротко, то синергетика - це теорія самоорганізації. У більш детальному визначенні - це галузь науки, яка вивчає процес, за допомогою якого складні системи спонтанно переходять від неупорядкованого, нерівноважного стану до більш впорядкованого. Синергетика розкриває зв'язки між елементами, які складають цю систему, і їх комбінаторні ефекти є більшими, ніж сума ефектів кожного елемента, що діє окремо.

Щоб краще зрозуміти витоки синергетики, давайте коротко розглянемо класичну термодинаміку 19 століття; у 20 столітті термодинаміка поширила свої дослідження на нерівноважні, неупорядковані відкриті системи. Цей напрям отримав назву "синергетика", від грецького слова "synergia" (співпраця, спільна дія).

Синергетика намагається відповісти на питання, як виникли всі макросистеми, в яких ми живемо. Вона змінила наші уявлення про Землю, походження матерії, Всесвіт, Землю, походження та еволюцію життя на Землі, а також про природу та еволюцію людини.

З точки зору синергетики, багатоваріантність, різноманітність шляхів, випадковість і навіть хаос є складовими механізму самоорганізації складних систем. Концепція самоорганізації визначає

універсальні закони для всіх явищ, яким притаманні нестабільність, нелінійність, флуктуації та біфуркації. Сфера синергетики охоплює всі явища, в яких існують асиметрії та антиномії.

Синергетика охоплює параметри складності і дисперсії (структури порядку), хаосу і порядку, стабільності і нестабільності, флуктуацій і атракторів (тенденції системи до саморозвитку), біфуркації і управління.

Синергетика підтримує висновок теорії відносності про те, що енергія веде до вищих і тонших рівнів організації. Сформульовано принцип саморуху в неживих об'єктах. Механізмами є спонтанні флуктуації, події в точках біфуркації та експоненціальні процеси до певного моменту.

Для більш чіткого розуміння уточнимо поняття флуктуацій. Флуктуації - це випадкові відхилення від рівномірного розподілу, які виникають, наприклад, в результаті теплового руху молекул в газі або рідині.

Згідно з сучасною науковою думкою, Всесвіт був створений флуктуаціями у вакуумі. Згідно з сучасною квантовою механікою, вакуум може перебувати у "збудженому стані" (це підтверджено сучасними фізичними експериментами), що призводить до утворення полів і, таким чином, до утворення матерії.

Згідно з новітньою концепцією фізичного вакууму, він володіє особливою творчою функцією - здатністю породжувати всесвіти, різноманіття яких утворює Надвсесвіт. Первісний фізичний вакуум, що заклав початок Всесвіту, за квантовою теорією поля має складну будову з кількома поверхнями, кожна з яких має свій енергетичний потенціал. Елементарні частинки, з яких складається речовина і антиречовина, є збудженими станами вакууму.

Флуктуації додають вакууму особливу властивість - конкуренцію між нестійкістю через флуктуацію та колишньою стійкістю. Пройшовши поріг стійкості завдяки флуктуації, вакуум (як система) потрапляє в критичний стан, відомий як точка біфуркації. Навіть невелика флуктуація в цій точці біфуркації може визначити подальший розвиток, починаючи від правибуху або Великого вибуху праатому та еволюції в новому напрямку. Це є визначальним моментом у точці біфуркації, початком творчих актів.

У переломний момент, в точці біфуркації, неможливо передбачити подальший розвиток: система може стати більш хаотичною і припинити своє існування, або перейти на більш високий рівень упорядкованості, що відомо як дисипативна структура.

Синергетика відводить значне місце розгляду хаосу. З погляду синергетики, хаос є необхідним для того, щоб система виходила на аттрактор (точку притягання) та ініціювала самодобудову системи. Хаос є важливим для існування порядку.

Поняття "детермінований хаос" існує для пояснення переходу від хаосу до порядку в процесі самоорганізації. Стан детермінованого хаосу вважається фізично нормальним для всіх систем. Однак повний хаос або надпорядок вважається небажаним, а іноді навіть небезпечним.

Відмінності нерівноважних структур від рівноважних: система реагує на зовнішні умови; поведінка системи є випадковою і залежить від передісторії, а не від початкових умов; потік енергії створює порядок і зменшує ентропію системи; наявність біфуркацій - переломних моментів у розвитку системи; когерентність: Система поводить як єдине ціле і має далекосяжні взаємодії.

З точки зору синергетики, кожна система містить підсистеми, які постійно змінюються і флуктують. Іноді одна флуктуація або

комбінація флуктуацій стає настільки сильною, що організація, яка колись існувала, не витримує і руйнується.

Отже, основні концепції синергетики такі:

- Порядок виникає з хаосу, існує глибокий взаємозв'язок між хаосом і порядком.
- Флуктуація виступає творцем організації, випадковість відіграє конструктивну роль у еволюційних процесах.
- Розмаїтість є основою стійкого та дисциплінованого розвитку систем.
- Еволюція є нелінійною (багатоваріантною).
- Розвиток систем, як в історичній ретроспективі, так і в перспективі, є нелінійним і має альтернативи.
- Світ і наукове знання про нього є системними та цілісними.
- Розвиток об'єктів усіх рівнів матеріальної і духовної організації відбувається за загальними закономірностями.

Основні принципи самоорганізації, які лежать в основі синергетики, включають:

- Система для самоорганізації повинна бути відкритою, тобто обмінюватися речовиною, енергією та інформацією з оточенням.
- Самоорганізація завжди пов'язана з кооперативним процесом, колективним узгодженим поведінням частин системи, що призводить до виникнення нових структур.
- Випадковість та реальна ситуація є конструктивними початками та основою для процесу розвитку. Самоорганізація відбувається в результаті взаємодії випадковості та необхідності та завжди пов'язана з переходом від нестійкості до стійкості.

### **Питання для самостійного контролю.**

1. Перелічить емпіричні та теоретичні методи пізнання
2. Вмітимете розрізняти види наукових досліджень та їх класифікацію

3. Визначатиме поняття методів наукового дослідження
4. Класифікуватиме методи наукових досліджень
5. Перераховувати загальні методи наукового дослідження
6. Дасть визначення емпіричним методам дослідження
7. Перелічити та пояснити теоретичні методи дослідження; 8. визначити методи аналізу та синтезу
8. Охарактеризувати методи аналізу та синтезу.
9. Що таке синергетичний підхід до дослідження? Для дослідження яких систем використовується цей підхід?
10. Охарактеризуйте методологічний підхід, що використовується в галузі технологічних наук.

## **РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ЗАДАЧ І СИНТЕЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВИРОБІВ**

У цьому розділі систематично викладено послідовність вирішення проектних завдань, представлені методи для кожного етапу проектування виробу, а також розглянуті підходи до правильного формулювання, аналізу та вирішення технічних протиріч для успішного вирішення цих завдань.

### **2.1. Основні етапи процесу рішення проектних задач і їхнє методологічне забезпечення**

Для аналізу завдань, що виникають при проектуванні виробу або технічної системи, розглянемо їх класифікацію. Для цього розглянемо технічну задачу як систему, що складається з трьох складових: А - вплив; В - об'єкт, який піддається перетворенню; С - результат, який бажають отримати завдяки перетворенню об'єкта.

Творчий процес вирішення задачі передбачає пошук рішення в умовах невизначеності та нестачі інформації. Ступінь невизначеності може варіюватися і може відноситися до різних елементів задачі. Наприклад, якщо відомі перетворення і впливи А і матеріальний об'єкт В, але результат С невідомий, то це визначає умови стандартної науково-дослідної задачі, де визначені фактори і величини змінюються, але взаємозв'язок між ними - це мета дослідження. У випадку, коли мова йде про технічний результат, зміни технічних і техніко-економічних показників, то це відповідає винахідницькій задачі.

Розглянемо кілька прикладів. Наприклад, при нагріванні А всі тіла В розширюються, і якщо невідомий технічний результат С, який може бути отриманий за допомогою ефекту теплового розширення. Для вирішення цієї ситуації можна використовувати, наприклад,



пристрій для мікропереміщення об'єктів, що містить стрижень з нагрівачем. Визначені впливи А, відомий технічний результат С, але невідомий об'єкт В. В цьому випадку можна вирішити технічну задачу вибором нового матеріалу або конкретної технічної системи при відомому впливі А на неї. Наприклад, для зниження коефіцієнта тертя та коефіцієнта теплопередачі при прокатці труб можна використовувати мастило на основі порошку триполіфосфата натрію.

Є випадки, коли відомий матеріальний об'єкт В та необхідний результат С, але невідомо, як вплинути на об'єкт В, щоб досягти С. Це є типовою винахідницькою задачею, де перетворення технічного об'єкта виконується з певною метою. Наприклад, зручність транспортування стружки від металорізальних верстатів - це задача, яку можна вирішити впливом магнітного поля на стружку.

Ці приклади ілюструють крайній випадок, коли лише один з трьох елементів проблеми є невизначеним. На практиці, однак, частіше зустрічається більше одного невизначеного елемента. Щоб усунути цю неоднозначність, ми вводимо поняття коефіцієнта визначеності К, який вимірює наявну інформацію, необхідну для правильного вибору елементів технічного завдання. При застосуванні до кожного елемента А, В і С формується набір показників:  $K_a$ ,  $K_v$  та  $K_s$  - коефіцієнти визначеності впливу, об'єкта та результату. Ці показники можуть характеризувати клас, рівень і стан інженерної задачі, а їх перемноження дає коефіцієнт визначеності  $K_{avs}$  для всієї задачі. Чим вище значення К, тим меншою є винахідницька задача: Якщо  $K_{avs} \rightarrow 1$ , ми маємо справу з нормальною інженерною задачею, всі складові якої майже повністю визначені. Це означає наступне.

Рівень креативності технічного рішення можна виміряти кількістю спроб і помилок, необхідних для знаходження правильного варіанту. Коефіцієнт достовірності К можна виразити як величину, обернену до кількості зразків N:  $K_a = 1/N_a$ ,  $K_v = 1/N_v$ ,  $K_s = 1/N_s$  ( $N_a$  -

кількість варіантів,  $N_v$  - кількість варіантів об'єктів і матеріалів,  $N_c$  - кількість варіантів результатів і технічних параметрів).

Під час відбраковування пройдених варіантів, "порожніх проб", коефіцієнт визначеності задачі збільшується, оскільки зменшується кількість залишених варіантів.

Практика вирішення проектних задач показує, що особа, яка оволоділа основними існуючими прийомами та методами пошуку нових технічних рішень та має певний винахідницький досвід, не використовує всі прийоми та процедури, які пропонують відомі методики. Замість цього вона користується лише їх окремими, найбільш потужними розділами (блоками), розташованими в певній послідовності (яка може змінюватися в залежності від типу проблемної ситуації). Це можна уявити як свій власний скорочений "алгоритм".

У той же час, дослідження, проведені інженерами (винахідниками), мають певні загальні етапи, риси і використовувані прийоми, що дозволяє уявити процес рішення технічної задачі у вигляді схеми, складеної з декількох найбільш характерних частин (рисунок 1).

Короткий зміст етапів рішення проектної задачі, і їхнє методологічне забезпечення представлено в табл. 1.

Таблиця 1 - Основні етапи проектування виробу і  
їхнє методологічне забезпечення [29]

Етап	Назва та зміст етапів	Методологічні засоби
0	<i>Виявлення недоліку</i> Аналіз технічних потреб замовника та технічних можливостей системи, їх порівняння та формулювання розбіжностей між ними.	Узагальнений евристичний алгоритм. Зворотний мозковий штурм.

Продовження табл. 1

Етап	Назва та зміст етапів	Методологічні засоби
1	<i>Визначення доцільності рішення</i> Визначення доцільності рішення Аналіз технічних, техніко-економічних, економічних, соціальних та інших показників майбутньої роботи.	Узагальнений евристичний алгоритм.
2	<i>Аналіз надсистеми</i> Виявлення зв'язків між технічними системами та іншими системами, аналіз цілісності цих систем на початковому та вищих ієрархічних рівнях.	Морфологічний аналіз. Методи та прийоми системного аналізу.

Продовження табл. 1

3	<p><i>Аналіз системи і підсистем, вибір задачі</i></p> <p>Визначення структури технічної системи.</p> <p>Визначення ієрархічного рівня технічної системи та її елементів.</p> <p>Аналіз отриманих технічних завдань, оцінка вирішуваності кожного завдання, вибір конкретних технічних завдань.</p>	<p>Морфологічний аналіз.</p> <p>Методи і прийоми системного аналізу</p> <p>Встановлення логічних ланцюжків причинно-наслідкових зв'язків між дефектами та їх причинами.</p> <p>Узагальнені евристичні алгоритми.</p>
---	---	--

Етап	Назва та зміст етапів	Методологічні засоби
4	<p><i>Аналіз технічної задачі</i></p> <p>Аналіз структури об'єкта, побудова моделей, визначення можливих перетворень.</p>	<p>Узагальнений евристичний алгоритм.</p> <p>Морфологічний аналіз.</p> <p>Теорія подібності та методи і прийоми моделювання, експериментальні та теоретичні дослідження.</p>
5	<p><i>Постановка задачі на винахід</i></p> <p>Характеристика технічних систем і формулювання ідеального результату, виявлення і з'ясування технічних протиріч.</p>	<p>Узагальнені евристичні алгоритми</p>

Продовження табл. 1

6	<p><i>Пошук ідеї рішення</i></p> <p>Порівняння винахідницьких задач з вирішеними технічними проблемами, пошук подібностей. Вибір методів і нових принципів дії для досягнення ідеального результату.</p>	<p>Фонд фізичних ефектів.          Фонд технічних рішень.          Обґрунтування евристик і таблиць розв'язання технічних протиріч.          Узагальнені евристичні алгоритми.          Мозковий штурм.          Синектика.          Метод контрольних запитань.          Асоціативний метод пошуку технічних рішень.          Морфологічний аналіз.</p>
---	--	--

Етап	Найменування і зміст етапу	Методологічні засоби
7	<p><i>Синтез нового технічного рішення.</i></p> <p>Присвоєння елементам технологічної системи функцій (принципів дії), необхідних для ідеї рішення, та їх перетворення</p> <p>Морфологічний аналіз.</p>	<p>Морфологічний аналіз.          Синтез технічних систем з використанням матриці потенційних змін властивостей елементів системи.          Узагальнений евристичний алгоритм.</p>

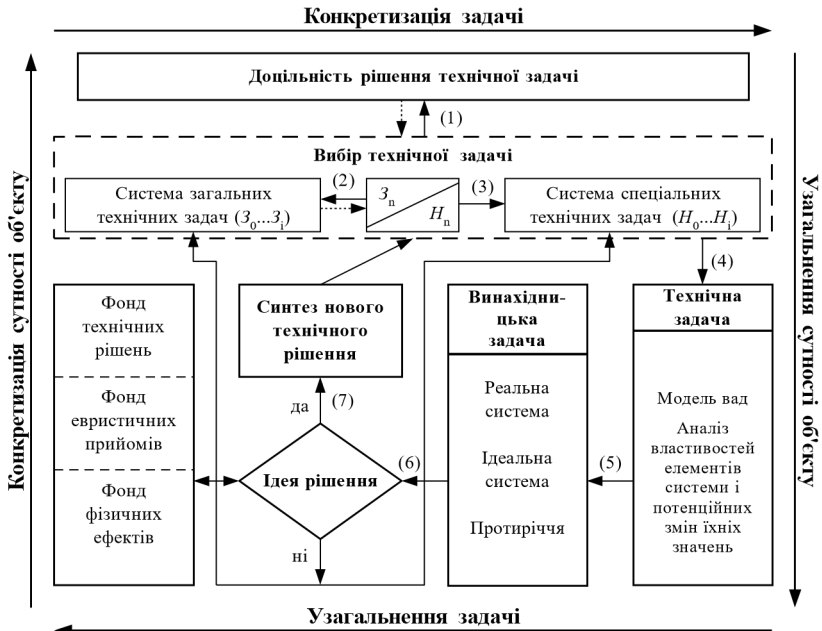


Рисунок 1 – Схема циклу рішення технічної задачі [29]. Опис етапів 1 – 7 представлено в табл. 1.

## 2.2. Постановка задачі

Якщо потужність технологічної системи не задовольняє (або навряд чи задовольнить) потреби споживачів, вона є потенційною мішенню для вирішення науково-технічних проблем, спрямованих на усунення виявлених недоліків.

Методи науково-технічного прогнозування відіграють важливу роль у виявленні технічних недоліків і можуть передбачити споживчий попит, технічні можливості системи та невідповідність між ними з "коригуванням у часі" в майбутньому [30]. Прогнозування - це форма творчої діяльності, яка дозволяє своєчасно виявляти нові

виклики та знаходити шляхи їх вирішення до того, як з'являться недоліки.

Важливо зазначити, що успішне прогнозування питань, які сьогодні ще не мають практичного значення, часто гарантує новизну рішення та полегшує його правовий захист.

Беручи до уваги існуючу структуру, цілісність та ієрархію технічної системи, а також параметри, що характеризують технічну та соціальну систему, виникає ряд відповідних технічних недоліків та їх причин, викликів та цілей. Ці недоліки і проблеми, як і технічна система, частиною якої вони є, мають структуру та ієрархію.

Відбір технічних питань передбачає попередній аналіз системи, про яку йдеться, і є творчим етапом, від якого залежить кінцевий результат. Іноді попередньо обрану проблему доручають комусь іншому. Наприклад, складність прибирання снігу з даху може бути не пов'язана з ручним прибиранням, а спричинена намерзлим льодом, що утворюється на краю даху. У цьому випадку технічна проблема запобігання намерзанню льоду є більш загальною, ніж було сформульовано спочатку, і її вирішення може призвести до більш ефективних рішень.

Тут ми маємо справу з поняттям "проблема уникнення", тобто проблема, що впливає не з початково сформульованої проблеми, а з більш загальної проблеми, де ці дві проблеми мають особливий (паралельний) взаємозв'язок.

Попереднє рішення може бути представлене наступним чином. Припустимо, що виявлений дефект (задача g221) і його усунення є задачею g211 (рис. 2). Розглянемо більш загальні задачі z21 і z2 для пошуку причини дефекту. Аналіз однієї з більш загальних задач, наприклад, z2, виявляє інші специфічні задачі та шляхи їх вирішення, наприклад, шлях "уникнення", наприклад,  $z2 \rightarrow z22 \rightarrow z222 \rightarrow z2221$ . У цьому випадку цей шлях є "обхідним" для початкової (паралельної) задачі z221, але "прямим" для більш загальної задачі z2.

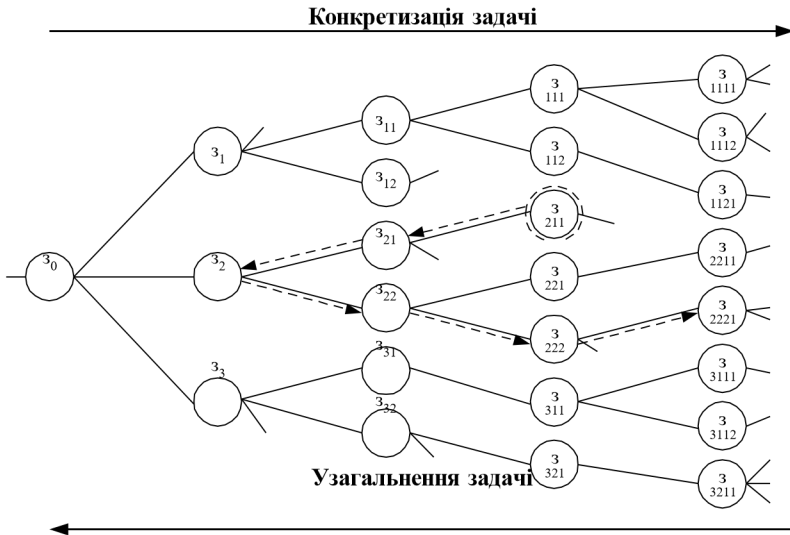


Рисунок 2 – Система науково-технічних задач

Для того, щоб відобразити систему технічних труднощів, необхідно, по-перше, визначити структуру і технічний стан (можливості) самої технічної системи та її підсистем; по-друге, врахувати систему потреб і запитів її користувачів; по-третє, порівняти ці дві системи і сформулювати технічні дефекти і труднощі.

При вирішенні "прямих" і більш конкретних завдань зручно використовувати метод виявлення причин технічних дефектів і побудови логічного ланцюжка причинно-наслідкових зв'язків між дефектами і їх причинами. Суть цього методу полягає в інженерному аналізі, який разом з логічною оцінкою системи дозволяє проводити більш глибокі, спеціалізовані експериментальні та теоретичні дослідження. Якщо в процесі аналізу не вдається виявити причину або механізм виникнення дефекту, така інженерна задача може



перетворитися на наукову, спрямовану на отримання нових знань про об'єкт дослідження.

В принципі, кожне з'єднання в системі (див. рис. 2) може слугувати відправною точкою для вирішення технічної задачі, але важко визначити конкретні критерії вибору. Такими критеріями можуть бути швидкість і простота реалізації, економія часу і трудових ресурсів, можлива економія, підвищення безпеки праці або інші фактори. Вибір технічної проблеми може полягати в усуненні першопричини виявленого дефекту або в усуненні елемента системи, який визначає найбільш значну зміну дефекту, але в обох випадках цей вибір вимагає детального аналізу.

### **2.3. Аналіз технічної задачі**

У визначених умовах технічної задачі розглядається система, що має вади і складається з елементів  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_n$ , кожен з яких володіє власними вадами. Елементи системи взаємопов'язані, і кожен із них виконує конкретну функцію, що визначає основну мету системи. На поточному етапі проектування важливо провести аналіз технічної системи, встановити її структуру і параметри, які характеризують її роботу.

Для цього слід створити список основних елементів технічної системи, без яких її функціонування є неможливим. Налаштувати інші елементи системи за їхньою функціональною важливістю для існування і функціонування системи, створити матрицю взаємозв'язків всіх елементів.

Ключовим є визначення головної функції (призначення) системи, встановлення основних і допоміжних параметрів, які можуть якісно і кількісно характеризувати роботу системи. Також важливо розібратися, які фактори впливають на параметри системи і як вони взаємодіють. На даному етапі важливо визначити основний принцип і

механізм дії досліджуваної системи, провести аналіз науково-технічної літератури та можливі наукові дослідження.

Основна мета цього етапу - отримати математичну або фізичну модель об'єкта. Подальші дослідження та трансформації в процесі вирішення задачі належать до модельних експериментів. Внаслідок отриманої моделі системи виникає модель технічної вади. Важливо визначити параметр технічної системи, який може характеризувати ваду, встановити причини виникнення цієї вади та її зміни. Рекомендується створити таблицю взаємозв'язків елементів, факторів та параметрів технічної системи з вагою.

Після побудови моделі технічної системи і моделі технічної вади слід спробувати вирішити задачу за допомогою стандартних перетворень, використовуючи фонд "стандартів" для рішення технічних задач. У разі невдачі інженерним чи конструкторським шляхом розв'язання технічної задачі вимагає більш глибокого аналізу з переходом до класу науково-технічних задач. На цьому етапі також важливо визначити можливості зміни технічної системи і межі таких змін, використовуючи метод аналізу властивостей.

Наприклад, розглянемо два об'єкти: скляну склянку і лінзу. Аналізуючи їхні властивості, можна визначити, що різниця між ними може бути у формі, масі і складі скла. Або, взявши два однакові залізні стрижні і намагнічуючи один з них, отримаємо різницю тільки в одній властивості. Інженер може описати будь-який матеріальний об'єкт численними властивостями, проте для багатьох об'єктів у певній галузі техніки значення всіх властивостей може бути представлено лише декількома десятками. Узагальнюючи, будь-який об'єкт можна розглядати як безліч властивостей, кожна з яких приймає визначене значення в конкретних обставинах. Такі властивості, як геометричні, кінематичні, динамічні, фізико-хімічні, тепло- та електротехнічні, оптичні та інші, можуть характеризувати будь-який

об'єкт. Наприклад, швидкість переміщення може визначати стан об'єкта, незалежно від того, чи це рухливий автомобіль чи нерухома будівля. Однак значення цієї властивості буде відмінним для рухливого об'єкта, де швидкість дорівнює 60 км/год, і нерухомого об'єкта, де вона рівна нулю.

Якщо взяти конкретний елемент системи і визначити значення кожної властивості зі списку властивостей матеріальних об'єктів, можна створити його опис. Матриця властивостей будується у вигляді списку, де вертикально розташовано властивості, по горизонталі - елементи технічної системи, а на перетинанні рядків і стовпців - значення властивостей елементів.

Наступним етапом є визначення потенційних змін властивостей елементів системи. Основний принцип методу аналізу властивостей передбачає широкі можливості зміни значень багатьох властивостей в кожному об'єкті. Однак існують властивості, чії значення залишаються в стислих межах або практично не змінюються, основними серед них є ті, які визначають сутність об'єкта. Наприклад, форма та розміри визначають склянку, що утримується в конкретних геометричних параметрах, які роблять її склянкою. У випадку лінзи важливі не лише геометричні, але і оптичні властивості матеріалу.

Для визначення того, наскільки і у чому варто змінювати нашу систему, необхідно аналізувати та оцінювати можливий інтервал зміни значень кожної властивості. Оцінка може бути виконана за допомогою балів на певній шкалі, наприклад, трибальній: "+", якщо значення властивості можуть змінюватися в широких межах, "0" - вузьких межах, і "-" - якщо зміни неможливі.

Характеристика потенційних змін властивостей елементів системи може бути подана у матричній формі. Ця матриця містить список властивостей по вертикалі та список елементів технічної

системи по горизонталі. У матриці вказані оцінки можливості зміни значень кожної властивості, а також додатковий стовпець для елемента "х", де будуть закодовані нові властивості та функції системи під час пошуку ідеї рішення.

Обидві згадані матриці можна об'єднати в одну, враховуючи існуючі значення властивостей елементів та оцінки можливостей їх зміни.

Крім того, аналіз властивостей елементів сприяє тренуванню та розвитку уяви, зменшенню психологічної інерції. Встановлення меж зміни значень властивостей дозволяє уявити елемент у межах найбільших та найменших значень властивостей.

Цей підхід є зручним, оскільки він дозволяє відійти від конкретних уявлень про окремий об'єкт на загальний для всіх клас об'єктів, що належать даній категорії. Таким чином, будь-який об'єкт описується тим самим набором параметрів, і кожен параметр не характеризує сам об'єкт, а описує лише одну властивість серед безлічі інших. Це дозволяє знаходити загальні риси між різними об'єктами, використовуючи значення окремих властивостей цих, усього різних, об'єктів.

#### **2.4. Формулювання умов задач, пошук ідеї рішення**

Технічна задача, яка не може бути вирішена за допомогою традиційних, стандартних інженерно-конструкторських прийомів, вимагає переведення в клас науково-технічних (винахідницьких) задач і подальшої обробки, що включає формулювання умов задачі та пошук ідей для її вирішення.

Умови задачі мають складатися з трьох ключових елементів: моделі технічної системи та її вад, ідеального кінцевого результату та технічного протиріччя, що виникає при порівнянні цих двох елементів.

Формулювання ідеального кінцевого результату важливо для визначення напрямку та високого рівня технічних рішень. Ідеальне вирішення представляє собою найсильніше з усіх можливих рішень для даної задачі. Для досягнення ідеальності технічного виробу (системи) застосовуються принципи: отримання корисного результату без самої дії або засобу, наявність лише необхідних властивостей для досягнення корисного результату, максимальне використання наявних властивостей елементів системи та її оточення та мінімізація витрат часу на досягнення корисного результату.

Три перших принципи ідеальності представляють собою етапи відступу від абсолютно ідеальної системи до реальності. Реалізація першого принципу можлива через використання виходів сусідніх систем та оточення, навіть якщо вони є некорисними.

Під час вирішення науково-технічної задачі важливо наблизитися до ідеального кінцевого результату, різко покращуючи певні показники без погіршення інших. Ідеальність вирішення досягається шляхом отримання бажаного ефекту "даром", без використання будь-яких засобів.

Важливим етапом у формулюванні ідеального результату є визначення елемента, який найбільше піддається змінам. Встановленням бажаного результату для цього елемента обмежується напрямком подальших пошуків та конструктивних змін. При використанні "зовнішнього середовища" як такого елемента розширюється поле пошуку, залишаючи можливість технологічних рішень, пов'язаних із зміною значень властивостей (параметрів) елементів системи.

Завдяки цьому підходу можна уникнути обмежень та визначити багатообіцяючі варіанти рішень задачі, враховуючи безмежні можливості змін значень властивостей "зовнішнього

середовища", яке може набувати будь-яку форму чи властивості, асоційовані з різними об'єктами та явищами.

Технічні суперечності розподіляються за ступенем конкретизації на технічні та фізичні. Технічні конфлікти можна висловити у формі: "якщо поліпшити параметр А відомим способом, то неприпустимо погіршитися параметр В" або "елемент А повинен виконувати дію В (мати необхідні властивості), але він не може цього здійснити (не має необхідних властивостей)". Наприклад, "якщо збільшити міцність конструкції, то неприпустимо збільшиться її вага" або "трубопровід повинен регулювати свій переріз, але його внутрішня частина не може звужуватися й розширюватися".

Фізичні суперечності можна виразити у формі: "елемент А повинен мати властивість В1 (для забезпечення С1), але також повинен мати властивість В2 (протилежну В1 для С2)" або "елемент А (з властивістю елемента) повинен (повинне) бути й не повинен (не повинне) бути". Наприклад, "елемент повинен бути провідником для пропускання електричного струму в напрямку 1, і повинен бути діелектриком для блокування електричного струму в напрямку 2" або "електропровідність повинна бути, а водночас і не повинна бути".

Після виявлення суперечностей проводиться пошук ідеї рішення або принципу дії, який дозволить подолати виявлені протиріччя. На рівні технічних суперечностей можна використовувати різні прийоми для подолання конфліктів, такі як :

1) *Принцип дроблення* визначає необхідність поділу об'єкта на частини, проведення аналізу кожної частини окремо та підвищення рівня деталізації шляхом розбиття на більш вдосконалені компоненти.

2) *Принцип винесення* визначає відокремлення від об'єкта тієї частини, яка заважає або виділення лише необхідної властивості для подальшої роботи чи аналізу.

3) *Принцип місцевої якості* покликаний перейти від однорідної структури об'єкта (чи процесу) до неоднорідного, де різні його частини мають різні функції та характеристики, оптимальні для їхнього використання.

4) *Принцип асиметрії* спрямований на перехід від симетричної форми до асиметричної, що може покращити властивості об'єкта та його адаптацію до різних умов.

5) *Принцип об'єднання* вказує на необхідність з'єднання у просторі чи часі однорідних або суміжних операцій чи об'єктів для створення єдиної, згуртованої системи.

6) *Принцип універсальності* передбачає використання об'єкта для виконання функцій інших об'єктів, навіть якщо у них вже немає прямої потреби.

7) *Принцип "матрьошки"* включає в себе розміщення одного об'єкта всередині іншого, утворюючи систему вкладених компонентів.

8) *Принцип антиваги* передбачає компенсацію ваги об'єкта за допомогою з'єднання з іншими об'єктами, які володіють підйомною силою, або взаємодією з середовищем за рахунок різних фізичних сил.

9) *Принцип попередньої напруги* включає введення деформації чи напруги до об'єкта задовго до виникнення небажаного стану з метою його попередження чи компенсації.

10) *Принцип попереднього виконання* ставить за мету проведення необхідних змін в об'єкті перед його використанням, розташування об'єктів так, щоб вони могли діяти з мінімальними витратами часу на їхню доставку.

11) *Принцип "засдалегідь підкладеної подушки"* передбачає компенсацію невисокої надійності об'єкту за допомогою засдалегідь підготовлених аварійних засобів. Це означає використання передбачених заходів, що дозволяють уникнути або пом'якшити

негативні наслідки, які можуть виникнути внаслідок непередбачених ситуацій чи відмов об'єкту.

12) Принцип рівнопотенційності спрямований на те, щоб змінити умови роботи так, щоб не було необхідності піднімати або опускати об'єкт. Це може включати в себе використання різних технологій чи розташування об'єктів так, щоб необхідності в опусканні чи підніманні знижувалися.

13) *Принцип "навпаки"* підкреслює необхідність виконання зворотної дії замість передбаченої. Наприклад, зробити рухливу частину нерухомою і навпаки, чим можна змінити звичайний порядок подій та використовувати протилежний хід.

14) *Принцип сфероїдальності* полягає в переході від прямолінійних частин об'єкта до криволінійних, а також від плоских поверхонь до сферичних. Це може включати використання роликів, кульок, спіралей та інших форм для покращення характеристик об'єкта.

15) *Принцип динамічності* покликаний забезпечити оптимальні характеристики об'єкту на кожному етапі роботи. Це може включати розділення об'єкта на рухомі частини та надання рухомості раніше нерухомих елементам.

16) *Принцип часткового* або надлишкового рішення вказує, що якщо складно забезпечити 100% необхідної дії, слід забезпечити менше чи більше, але так, щоб це відповідало потребам.

17) *Принцип переходу в інший вимір* стимулює збільшення ступенів свободи об'єкту, переходячи від руху в одному вимірі до руху в декількох вимірах, використовуючи багатоповерхове компонування та зворотний бік поверхні.

18) *Принцип використання механічних коливань* включає приведення об'єкта в коливальний рух, зміну частоти та використання резонансних та ультразвукових частот.



19) *Принцип періодичної дії* передбачає перехід від безперервної дії до періодичної та зміну періодичності.

20) *Принцип безперервності корисної дії* спрямований на ведення роботи безупинно, усунення неробочих та проміжних періодів, а також перехід від зворотно-поступального до обертового руху.

21) *Принцип "перескакування"* визначає необхідність подолати окремі, включаючи шкідливі й небезпечні, етапи процесу на підвищеній швидкості. Це передбачає стрімке та ефективне проходження етапів без затримок, сприяючи прискоренню процесу.

22) *Принцип "перетворення шкоди на користь"* передбачає використання шкідливих факторів для досягнення позитивного ефекту. Це може включати підсилення шкідливого фактора настільки, щоб він перестав бути шкідливим, або компенсацію одного шкідливого фактора іншим для досягнення позитивного результату.

23) *Принцип зворотного зв'язку* передбачає введення або зміну існуючого зворотного зв'язку для поліпшення системи. Зворотний зв'язок дозволяє виявляти, аналізувати та коригувати відхилення в роботі об'єкта.

24) *Принцип "посередника"* вказує на використання проміжного об'єкта-переносника для забезпечення комунікації чи обміну інформацією між об'єктами. Це може сприяти вирішенню завдань, що вимагають посередництва.

25) *Принцип самообслуговування* передбачає, що об'єкт повинен бути здатний сам себе обслуговувати, виконувати допоміжні й ремонтні роботи, а також використовувати відходи речовини та енергії для підтримки свого функціонування.

26) *Принцип копіювання* вказує на використання спрощених і дешевих копій складних, дорогих або недосяжних об'єктів, включаючи оптичні видимі інфрачервоні та ультрафіолетові копії в зміненому масштабі.

27) *Принцип заміни дорогої довговічності на дешеву недовговічність* передбачає заміну дорогих об'єктів набором дешевих, при цьому можливо втрачаючи деякі якості, наприклад, довговічність.

28) *Принцип заміни механічної схеми* включає заміну механічної схеми об'єкта на електричну, оптичну, теплову, акустичну або "запахову". Це може включати використання електричних, магнітних та електромагнітних полів для взаємодії з об'єктом, а також перехід від стаціонарних полів до тих, що змінюються.

29) *Принцип використання пневмо- і гідроконструкцій* передбачає використання газоподібних і рідких елементів замість твердих частин об'єкта, таких як надувні та гідронаповнювані елементи, повітряні подушки, гідростатичні та гідрореактивні системи.

30) *Принцип використання гнучких оболонок і тонких плівок* вказує на використання гнучких оболонок і тонких плівок замість об'ємних конструкцій для ізоляції об'єкта від зовнішнього середовища.

31) *Принцип використання пористих матеріалів* передбачає зроблення об'єкта або його частин пористими, заповнюючи пори якою-небудь речовиною. Це може сприяти зменшенню ваги об'єкта, покращенню теплоізоляції та іншим позитивним характеристикам.

32) *Принцип зміни кольору* передбачає зміну кольору або ступеня прозорості об'єкта або зовнішнього середовища. Для цього можна використовувати барвники, мічені атоми та інші засоби, що змінюють візуальні характеристики.

33) *Принцип однорідності* вимагає, щоб об'єкти, що взаємодіють між собою, були виготовлені з того ж матеріалу або матеріалів, близьких за властивостями. Це може сприяти ефективнішій взаємодії та уникненню конфліктів.

34) *Принцип відходів або регенерації частин* передбачає, що частини об'єкта, які виконали своє призначення або стали непотрібними, повинні бути відкинуті, розчинені, випаровані тощо. В

той час як частини, які підлягають витратам, повинні піддаватися відновленню під час роботи.

35) *Принцип зміни фізико-хімічних параметрів об'єкту* включає зміну агрегатного стану, хімічного складу, концентрації, консистенції, температури, об'єму тощо. Це може впливати на властивості об'єкта та його взаємодію з оточуючим середовищем.

36) *Принцип використання фазових переходів* передбачає використання змін параметрів, які відбуваються при фазових переходах, таких як зміна обсягу, виділення або поглиблення тепла тощо.

37) *Принцип використання термічного розширення* передбачає використання термічного розширення та стиску матеріалів, а також застосування матеріалів з різними коефіцієнтами термічного розширення для досягнення певних ефектів.

38) *Принцип використання сильних окислювачів* передбачає уведення збагаченого повітря або кисню, вплив на об'єкт іонізуючими випромінюваннями, а також використання озонованого кисню для певних цілей.

39) *Принцип зміни ступеня інертності* передбачає заміну звичайного середовища нейтральним, уведення в об'єкт нейтральних частин та добавок, а також проведення процесу в вакуумі.

40) *Принцип використання композиційних матеріалів* вказує на перехід від однорідних матеріалів до складних композитних структур.

На рівні фізичних протиріч рішення можна шукати, зокрема, використовуючи передумови та показники фізичних, фізико-хімічних та інших ефектів і явищ [4, 18]. Наведемо можливі варіанти використання фізичних та фізико-хімічних ефектів і явищ для вирішення завдань при проектуванні технічних виробів (систем):

- Зміна температури (зниження, підвищення, стабілізація).
- Демонстрація положення та руху об'єктів.
- Керування потоками рідин, газів та аерозолів.
- Перемішування сумішей і створення розчинів.
- Поділ сумішей і стабілізація положення об'єктів.
- Прикладання зусиль і контроль зусиль.
- Створення високого тиску.
- Зміна тертя та руйнування об'єктів.
- Накопичення механічної та теплової енергії
- Передача енергії (механічної, теплової, променевої та електричної).
- Взаємодія між рухомими (змінюваними) і нерухомими (незмінними) об'єктами.
- Вимірювання розмірів (властивостей) об'єктів та зміни їх значень.
- Керування станом об'єкта або зміна властивостей його поверхні (чи об'ємних властивостей).
- Формування певної структури та стабілізація структури об'єкта.
- Демонстрація електричних, магнітних і радіаційних (світлових) полів та керування їх параметрами.
- Ініціювання та інтенсифікація хімічних змін.

На обох рівнях суперечності при формулюванні умов науково-технічних задач можуть бути використані параметричні методи [12], аналогії з різних технічних галузей та фонд перетворень "речовина-поль" [4].

При визначенні ідей рішень (при переході від понять до принципів) слід враховувати взаємозв'язок багатьох властивостей елементів системи і взаємозалежність їх значень. Наприклад, вага залежить від маси, маса - від розміру, тиск - від температури і т.д. Ці

взаємозв'язки можна визначити, аналізуючи властивості. Їх також можна визначити, побудувавши матрицю взаємозалежності властивостей елементів, а також матрицю взаємозв'язків між елементами системи. Якщо рішення не знайдено, необхідно повернутися до попереднього кроку, вибрати іншу технічну задачу і повторити всі кроки з цією задачею.

## **2.5. Синтез нового технічного рішення**

Зіткнувшись з недоліками, які необхідно виправити шляхом трансформації, система стає прототипом для нових технологічних рішень. Ідеї, які виникають в результаті попереднього аналізу технічних труднощів, є початком нової технічної системи. Вона виникає з окремих аспектів, що є наслідком недоліків старої системи. Однак самої технічної системи ще не існує. Прототип повинен бути синтезований шляхом перетворення відповідно до ідеї рішення.

Зазвичай ідея рішення формулюється як певний фізичний принцип або конкретний набір дій і функцій, які будуть використані в майбутньому об'єкті, який ще не створено. Вона може бути виражена як система функцій елементів, з яких складається майбутній технічний об'єкт, і з цих функцій потрібно визначити і створити нову технічну систему.

В принципі, ідея рішення та елементи технологічної системи можуть бути визначені набором її характеристик. Для цього можна визначити характеристики середовища та елементів, які будуть використовуватися, а також контролювати і змінювати їх значення. При синтезі технічних рішень визначаються матеріальні носії значень властивостей і функцій, що відповідають ідеям. Для того, щоб заощадити витрати і зробити рішення більш витонченим, слід

спочатку спробувати надати нові функції існуючим елементам системи, змінивши значення деяких їх властивостей.

Слід зазначити, що існуючі елементи можуть не підходити для виконання нових функцій. У такому випадку слід додати додаткові елементи. Перерозподіл функцій також може призвести до значного спрощення технічної реалізації елемента або видалення частини елемента.

Концепція рішення може бути відображена в матрицях аналізу характеристик елементів технічної системи і потенційних змін їх характеристик. Ці матриці містять додатковий стовпчик для оточення допоміжного елемента. У ньому відображаються характеристики середовища та їх значення, необхідні для реалізації ідеї рішення. Потім необхідно розглянути можливість зміни цих властивостей інших елементів технічної системи. Якщо значення елемента збігаються з властивістю середовища, вона призначається цьому елементу технічної системи. Якщо в системі немає елемента, який може успадкувати властивості середовища, додається додатковий елемент. Таким чином, на етапі синтезу нової технічної системи для формалізації процедур цього етапу може бути використаний метод аналізу характеристик (матриця характеристик).

На цьому етапі елементи технічної системи повинні бути попередньо розділені на дві групи: продукти та інструменти. Продукти, як правило, - це елементи, значення характеристик яких не можуть бути змінені (менш здатні виконувати функції середовища). Інструменти більше піддаються змінам і адаптації. Якщо продукт є носієм характеристик середовища, то ці характеристики можуть з'явитися через вплив на продукт інших елементів системи, а саме інструментів.

Після того, як структура нової технологічної системи визначена, починається конструкторсько-технологічна розробка

конкретного рішення, яке буде реалізовано на практиці. Цей етап включає в себе всі етапи, характерні для процесу проектування будь-якого технічного об'єкта. Якщо інформації для проектування недостатньо, проводяться додаткові експериментальні та теоретичні дослідження або створюється фізична модель.

Після того, як рішення остаточно оформлене у вигляді конкретного об'єкта, його технічні, технологічні, економічні та інші показники повинні бути вивчені і порівняні з аналогічними показниками прототипу для визначення ефективності рішення.

Заключний етап процесу вирішення технічної проблеми є також першим етапом процесу нового рішення, тобто виявлення недоліків створеної технічної системи. Таким чином завершується один цикл і починається новий цикл вдосконалення технічного рішення.

#### **Питання для самостійного контролю.**

1. Опишіть план вирішення технічної проблеми.
2. Перелічіть етапи вирішення проектної задачі та їх методологічну основу.
3. Яку роль відіграє аналіз технічної проблеми?
4. Опишіть метод функціонального аналізу. Які можливості надає цей метод при аналізі технічних проблем?
5. Що таке визначення ідеального кінцевого результату?
6. Перерахуйте основні елементи умови задачі.
7. Наведіть приклади технічних і фізичних протиріч.
8. Типові прийоми подолання технічних протиріч.
9. Які фізичні та фізико-хімічні ефекти і явища використовуються для пошуку технічних рішень для подолання фізичних протиріч?
10. Що таке "план рішення"?

11. У чому різниця між виробами та інструментами як елементами технічної системи?



## РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПОШУКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

У даному розділі подано загальний нарис методів виявлення новаторських науково-технічних рішень та стимулювання творчості у процесі розробки технічних виробів (систем). Детально розглянуті найбільш поширені підходи, такі як методи асоціації та контрольних питань, мозковий штурм (атаки), синектика та морфологічний аналіз.

### 3.1. Загальні поняття про методи пошуку

При розробці нових технічних виробів (систем) завжди виникають виклики у пошуку (винаходженні) нових та більш ефективних конструкторсько-технологічних рішень, зокрема тих, що перевершують рівень існуючих. Ця ситуація вимагає від наукових співробітників та інженерів необхідної володіння інтенсивною технологією інженерного творіння, а також розкриття їх творчих нахилів і здібностей.

На сьогоднішній день існує понад 100 методів активізації наукової та інженерної творчості, які можна умовно розділити на наступні категорії:

1. *Евристичні методи* технічної творчості, які спрямовані на пошук нових технічних рішень без використання комп'ютерних технологій.

2. *Комп'ютерні методи* пошукового конструювання, що базуються на використанні сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій.

При більш детальній класифікації методів інженерного творення вони можуть бути розподілені на 4 групи:

1. *Системні* (комбінаторні або гібридні), які орієнтовані на послідовний перебір усіх можливих варіантів рішень на основі аналізу, будови і властивостей технічних виробів (систем).

2. *Асоціативні* (психологічна активізація творчості), які передбачають стимулювання генерації ідей шляхом психологічного подолання інерції мислення і представляють безсистемний пошук рішень.

3. *Програмні* (алгоритмічні), які забезпечують цілеспрямований рух до вирішення задачі через виявлення технічних і фізичних протиріч у відомих технічних виробах і їх подолання.

4. *Комбіновані*, які створено сполученням трьох перших груп методів.

У таблиці 2 представлені деякі відомі методи (і методики) пошуку нових технічних рішень.

Таблиця 2 — Методи пошуку нових технічних рішень

№	Назва методу	Автор
<i>Великобританія</i>		
1	Метод фундаментального проектування	Є. Матчетт
2	Метод контрольних питань	Т. Ейлоарт
3	Метод функціонального винахідництва	К. Джонс
4	Метод розчленованого проектування	
5	Метод ліквідації безвихідних ситуацій	
6	Метод трансформації системи	
<i>Німеччина</i>		
7	Метод каталогу	Ф. Кунце
8	Метод організуючих понять	Ф. Ханзен

9	Метод конференції ідей	В. Гильде й ін.
10	Систематична евристика	И. Мюлер й ін.
11	Аналіз витрат на основі споживчої вартості	Х. Еберт, К. Томас
<i>СРСР</i>		
12	Метод економічного аналізу й елементного відпрацювання конструкторських рішень	Ю. Соболев
13	Алгоритм рішення винахідницьких завдань	Г. Альтшулер
14	Метод спрямованого мислення	Н. Серєда
15	Методика семиразового пошуку	Г. Буш
16	Метод психоевристичного програмування	В. Чавчанидзе й ін.
17	Метод використання бібліотеки евристичних прийомів	А. Половінкін
18	Метод системно-логічного підходу до рішення винахідницьких завдань	В. Шубін
19	Метод гірлянд випадків й асоціацій	Г. Буш
20	Узагальнений евристичний алгоритм	А. Половінкін й ін.
21	Метод десяткових матриць пошуку	Р. Повілейко
22	Метод виявлення узагальнених прийомів на основі аналізу описів винаходів	М. Заріпов й ін.

Продовження табл. 2

№	Назва методу	Автор
23	Вепольний аналіз	Г. Альтшулер
24	Методика аналізу властивостей і синтезу технічних рішень	А. Чус
25	Аксіоматичний метод понять	В. Скоморохов
<i>США</i>		

26	Морфологічний аналіз	Ф. Цвіккі
27	Синектика	В. Гордон
28	Метод контрольних питань	Д. Пойа
29	Інженерно-вартісний аналіз	Л. Майлз й ін.
30	Метод контрольних питань	Р. Кроуфорд
31	Метод відомостей характерних ознак	Р. Кроуфорд
32	Метод мозкового штурму	А. Осборн
33	Метод контрольних питань	С. Пірсон
34	Метод фокальних об'єктів	Ч. Вайтінг
35	Метод аналізу витрат і результатів	Ю. Фанге
36	Метод творчого інженерного конструювання	Г. Буль
37	Метод контрольних питань	А. Осборн
38	Метод раціонального конструювання	Р. Мак-Крори
39	Метод східчастого підходу до рішення задач	А. Фрейзер
40	Метод музейного експерименту	Колектив авторів
<i>Франція</i>		
41	Метод "матриць відкриття"	А. Моль
42	Метод "Креатіке"	Коллект. авт.
43	Інтегральний метод "Метра"	І. Бувен й ін.
<i>Чехія</i>		
44	Метод комплексного рішення проблем	С. Віт

Продовжимо розглядати кілька з найбільш поширених методів активізації пошуку рішень у процесі проектування нових технічних виробів (систем).

### 3.2. Асоціативні методи пошуку

Методи активізації творчого мислення, що ґрунтуються на асоціативних підходах, використовують семантичні властивості понять за допомогою аналогій їх вторинних змістових відтінків. Основними джерелами для створення нових ідей у цьому контексті виступають асоціації, метафори та випадково обрані поняття [8, 9].

До асоціативних методів входять техніки, які дещо аналогічні одна одній, такі як метод каталогу, метод фокальних об'єктів, метод гірлянд випадків та асоціацій [9, 27]. Можна встановити логічний зв'язок між абсолютно різними, непов'язаними поняттями (словами) на чотири-п'ять етапів [16]. Наприклад, розглянемо два відмінні поняття — "деревина" і "м'яч". Проведемо асоціативний перехід: "деревина" — "ліс", "ліс" — "поле", "поле" — "футбольне", "футбольний" — "м'яч". Або візьмемо "небо" і "чай": "небо" — "земля", "земля" — "вода", "вода" — "пити", "пити" — "чай".

Встановлено, що середньо число прямих асоціативних зв'язків для будь-якого поняття (слова) становить приблизно десять. Один асоціативний крок дає можливість вибирати з 10 слів, другий — з  $10^2$ , третій — з  $10^3$ , четвертий — з 10 . Таким чином, кожен наступний крок значно збільшує кількість зв'язків даного поняття з іншими, розширюючи можливості вибору ідей рішень.

Винахідництво - це пошук віддалених подібностей і перенесення знань з однієї галузі в іншу, що нерозривно пов'язане з інтерпретацією чогось нового за допомогою відомих понять. Тому важко уникнути використання нетипової мови, переносних значень і метафоричних виразів, які викликають нові асоціації. Ці вирази класифікуються за схожістю, контрастом, послідовністю та значенням. Асоціації за подібністю використовуються для інтуїтивної аналогії, асоціації за контрастом - для інтуїтивного перевертання, асоціації за

безперервністю - для трансформації у просторі та часі, асоціації за змістом - для семантичної інтерпретації проблемних ситуацій та для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між технічними об'єктами, елементами, людьми, навколишнім середовищем тощо.

Метафори можуть бути корисними як підказки для пошуку нових ідей, але їх використання вимагає сильних навичок нетрадиційного мислення. Щоб полегшити цей процес, можна використовувати техніки для інтерпретації значення метафор у технічних термінах. Водночас, використання гірлянд метафор (асоціацій), які є семантично пов'язаними між собою ланцюжками, може розширити простір пошуку ідей та підвищити їхню оригінальність. Найчастіше використовуються два типи гірлянд: концентровані гірлянди (кластери), що представляють різні аспекти ключового поняття, або безперервні метафоричні (асоціативні) гірлянди, де попередня метафора є ключовим поняттям для генерації наступної метафори.

Використовуючи "повітря" як ключовий концепт, концентрований метафоричний вінок може виглядати наступним чином: "повітря" - "невидиме середовище" (метафора-аналог) - "матеріальний дух" (метафора-каталепсія) - "те, що не можна рубати сокирою" (метафора-загадка). Такі поняття, як вакуум, алкоголь, повітряний транспорт, промінь, тінь, вітер та електрика використовуються для інтерпретації вінка в контексті завдання пошуку ідей для рішень.

Безперервний вінок метафор можна використовувати для виведення більш віддалених схожих (або протилежних) понять. Генерування метафор вимагає певного набору навичок, але може бути легко формалізоване.

Якщо властивості інших випадково вибраних об'єктів перенести на об'єкт, що вдосконалюється, то кількість несподіваних варіантів

рішень значно зростає. Ця ідея лежить в основі методу розвитку креативності (метод фокальних об'єктів), який був запропонований професором Берлінського університету Ф. Кунце в 1926 році (метод каталогів) і розвинений американським винахідником К. Вайтінгом в 1950-х роках. Метод фокальних об'єктів успішно застосовується при пошуку нових удосконалень відомих методів і пристроїв. Метод полягає в перенесенні властивостей випадково обраного об'єкта на об'єкт, який необхідно вдосконалити.

Щоб застосувати метод фокального об'єкта, зробіть наступне.

- Виберіть фокальний об'єкт (наприклад, годинник);
- Виберіть три-чотири випадкові об'єкти (випадково вибрані зі словника, каталогу, технічного журналу тощо).
- Перелічіть характеристики випадкових об'єктів (наприклад, широкоформатний екран для фільму, звук, колір, об'єм і т.д.).
- Генеруйте ідеї, асоціюючи властивості випадкових об'єктів з фокусними об'єктами (наприклад, широкоформатний годинник, годинник зі звуком, 3D-годинник).
- Розвивайте комбінацію через вільні асоціації (наприклад, широкоформатний годинник: широкий циферблат замість вузького, вузький циферблат іноді розширюється до широкого або проектується в іншому місці тощо).
- Оцініть ідеї та виберіть корисні рішення.

Ще одним розвитком методу фокальних об'єктів є метод "Гірлянди випадків та асоціацій", розроблений Г.Й. Бушем [9]. Цей метод допомагає знайти багато підказок для нових ідей шляхом створення ланцюжка асоціацій.

### **3.3. Методи контрольних питань**

Метод контрольних питань використовується для активізації творчого процесу з психологічного погляду. Його мета полягає в тому,

щоб, завдяки направляючим питанням, допомогти розв'язати поставлену задачу. Такі списки питань були запропоновані різними авторами, починаючи з 20-х років ХХ століття.

Метод може використовуватися у вигляді монологу співробітника (інженера, аспіранта), зверненого до себе, або діалогу, наприклад, у формі питань, які керівник мозкового штурму ставить членам групи генераторів ідей. Сутність методу полягає в тому, що співробітник відповідає на питання з певного списку і розглядає свою задачу у зв'язку з цими відповідями. Широко використовуються універсальні списки запитань, розроблені такими авторами, як А. Осборн, Е. Раудзенпом, Т. Ейлоарт, Д. Пірсон і інші. Ці списки містять різну кількість питань. Зокрема, за кордоном широко використовується список запитань, розроблений А. Осборном, який включає 9 груп питань.

Перелік контрольних питань за А. Осборном:

1) Які нові застосування можна запропонувати для технічного об'єкта? Чи можливі нові застосування? Як можна змінити відомі способи застосування?

2) Чи можна вирішити проблему шляхом адаптації, спрощення або зменшення? На що схожий цей технічний об'єкт? Чи приводить його схожість до нових ідей? Чи існують схожі проблемні ситуації, які могли бути використані в минулому? Що можна скопіювати? Який технічний об'єкт слід передбачити?

3) Які зміни можна внести в технічний об'єкт? Чи можна його змінити за допомогою обертання, нахилу, згинання або скручування? Які зміни можна внести до призначення (функції), кольору, руху, запаху, форми та зовнішнього вигляду? Які ще зміни можливі?

4) Що можна збільшити в технічному об'єкті? Що можна додати? Чи можна збільшити термін служби та ефект? Чи можна збільшити частоту, розмір, потужність? Чи можна покращити якість? Чи можна



додати нові компоненти? Чи можна повторити? Чи можна продублювати весь робочий елемент або об'єкт? Чи можна перебільшити або збільшити весь елемент або об'єкт?

5) Що можна зменшити в технічному об'єкті? Що можна модифікувати? Чи можна щось стиснути, ущільнити, сконденсувати, мініатюризувати, вкоротити, звузити, відокремити або дезінтегрувати?

6) Що можна змінити в технічному об'єкті? Що можна замінити, скільки і чим? Інший компонент? Інший матеріал? Інший процес? Інше джерело енергії? Інше місце розташування? Інші кольори, звуки, освітлення?

7) Які елементи технічного об'єкту можна трансформувати? Які компоненти можна взаємозамінити? Чи можливе змінення моделі? Зміна розподілу, розміщення, планування? Зміна порядку операцій? Транспозиція причин та ефектів? Зміна швидкості або темпу? Зміна режиму?

8) Які елементи технічного об'єкту можна перевернути навпаки? Транспозиція позитивних і негативних аспектів. Чи можливо обміняти місцями протилежно розташовані компоненти? Повернути їх задом наперед? Перевернути низ верх? Обміняти ролями? Перевернути затиск?

9) Які нові комбінації елементів технічного об'єкту можливі? Чи можна створити суміш, сплав, новий асортимент, гарнітуру? Комбінувати секції, вузли, блоки, агрегати? Комбінувати цілі? Комбінувати привабливі характеристики? Комбінувати ідеї?

Один із найефективніших підходів — використання списку контрольних питань, який був розроблений англійським винахідником Т. Ейлоартом.

1) Навести всі характеристики та ознаки очікуваного винаходу. Змінити їх.

2) Чітко сформулювати завдання. Проаналізувати нові формулювання. Виділити головні та аналогічні задачі, визначити другорядні.

3) Перерахувати недоліки існуючих рішень, їхні основні принципи та нові припущення.

4) Створити фантастичні, біологічні, економічні, молекулярні та інші аналогії.

5) Побудувати математичні, гідравлічні, електронні, механічні та інші моделі (які точніше виражають ідеї, ніж аналогії).

6) Випробувати різні матеріали та види енергії: газ, рідину, тверде тіло, гель, піну, пасту та інші; тепло, магнітну енергію, світло, силу удару тощо.

7) Встановити варіанти, залежності, можливі зв'язки, логічні збіги.

8) Дізнатися думку осіб, які не мають досвіду в даній області.

9) Провести сумбурні групові обговорення, слухаючи всі ідеї без критики, використовуючи методи психологічної активізації колективної творчості, такі як "мозковий штурм" і "синектика".

10) Випробувати "національні" підходи: хитре шотландське, всеосяжне німецьке, марнотратне американське, складне китайське та інші.

11) Постійно розмішувати задачу у своїй уяві вдома і на роботі.

12) Прогулюватися серед стимулюючого оточення (смітник металобрухту, технічні музеї, магазини дешевих речей), роздивляючись журнали та комікси.

13) Створити таблицю цін, величин, переміщень, типів матеріалів тощо для різних рішень проблеми або її частин, виявляти проблеми у рішеннях або нові комбінації.

14) Визначити ідеальне рішення, розробляти можливі.

15) Змінити рішення проблеми з точки зору часу (швидше або повільніше), розміру, в'язкості тощо.

- 16) Уявно потрапити всередину механізму.
- 17) Визначити альтернативні проблеми та системи, які вилучають певну ланку з ланцюга, тим самим створюючи щось абсолютно нове, відхиляючи від потрібного рішення.
- 18) Вирішити, чия це проблема і чому.
- 19) Дослідити, хто винайшов це першим, історію питання, існуючі хибні тлумачення цієї проблеми.
- 20) Визначити, хто ще вирішував цю проблему і досягнення, які вони отримали.
- 21) Встановити загальноприйняті граничні умови та причини їх установлення.

Також існує перелік питань від Д. Пойа, який відрізняється тим, що його питання складають певну систему (у порівнянні з іншими списками, де їх можна міняти місцями). Створений переважно для розв'язання математичних задач, список Д. Пойа також може бути застосований при вирішенні технічних завдань.

Найбільш універсальний анкетник, розроблений Г.Я. Бушем [7], відомий як анкетник уявного експерименту винахідника. Він містить різноманітні питання, такі як:

- Як розв'язати задачу, не враховуючи витрат?
- Якщо від розв'язання залежить людське життя, як це може бути вирішено?
- Якщо технічний об'єкт буде використовуватися як іграшка або як навчальний посібник, як це вплине на рішення задачі?
- Чи можна застосувати принципи розв'язання, відкинуті в минулому, зараз, використовуючи сучасні технічні можливості?
- Чи можна прогнозувати результат рішення задачі через 10–15 років, враховуючи зростання суспільних потреб?

— Як виглядає перелік основних недоліків відомих рішень задачі, і як вони можуть бути виправлені для досягнення більш ефективного рішення?

#### **3.4. Мозковий штурм. Синектика**

Метод мозкового штурму, розроблений американським підприємцем Едвардом Осборном у 1953 році, є одним із найбільш популярних способів психологічної активізації колективної творчості, який використовується для знаходження нових ідей у науці, техніці, адміністративній та торговельній сферах.

Унікальність цього методу полягає в тому, що для подолання психологічних перешкод, викликаних страхом критики, Осборн пропонує розділити в часі процеси генерації ідей та їхньої критичної оцінки [7]. Найкращі результати цей метод проявляє при розгляді організаційних завдань, таких як знаходження нового застосування виробленої продукції чи розробка нової форми реклами, а також при рішенні нескладних технічних завдань.

Метод мозкового штурму розділяють на прямий та зворотний. Під час прямого мозкового штурму умови задачі формулюються у загальних поняттях, вказуючи, що необхідно отримати або мати, і що заважає досягненню бажаного. Зворотній мозковий штурм приділяє основну увагу критиці, обираючи менш загальну і більш конкретну задачу, і розкриваючи протиріччя, дефекти, недоліки та обмеження проєктованого виробу.

Таким чином, при проєктуванні виробу вирішуються дві задачі: виявлення максимальної кількості недоліків в існуючих виробках та максимальне їх усунення у знову розроблювальному виробі.

Основні правила мозкового штурму.

1) Послідовне вирішення задач двома групами людей, які складаються з 3-15 чоловік у кожній.

Перша група, відома як "генератори ідей", пропонує різні концепції протягом 20-40 хвилин. Друга група, або "експерти", оцінює ці ідеї після завершення мозкового штурму. Групу "генераторів ідей" може складати постійне ядро і тимчасові члени, які додають різноманітність і експертність. Тимчасові члени включаються в залежності від характеру та змісту майбутньої задачі. Група "генераторів ідей" включає людей, схильних до абстрагування та обладнаних бурхливою фантазією. Група "експертів" краще працює з людьми, що мають аналітичний та критичний склад розуму.

Як правило, група "генераторів ідей" складається з постійного ядра групи та тимчасових членів, які відбираються по мірі розв'язання різних завдань методом мозкового штурму. У ядро групи входять керівник та співробітники, які легко генерують ідеї, а також добре знають правила і дотримуються їх. Тимчасові члени призначаються залежно від характеру та змісту майбутньої задачі. Творча група не включає природжених скептиків та критиканів, а також тих, чия присутність може заважати іншим, наприклад, керівникам і підлеглим. Тимчасові члени служать необхідним та гармонійним доповненням до ядра групи, забезпечуючи виконання наступних рекомендацій: число фахівців з розв'язання задачі повинно бути не більше половини; до складу групи слід включати фахівців-суміжників (конструкторів, технологів, економістів, постачальників і т. д.), які забезпечать комплексний та всебічний розгляд задачі; до складу групи корисно включати жінок, які мислять практично та оригінально, що стимулює та підвищує дух конкуренції серед чоловіків; рекомендується залучати "людей ззовні", які не мають відношення до задачі.

2) Основна мета "групи генераторів ідей" полягає в тому, щоб протягом виділеного часу висувати якнайбільше ідей, включаючи фантастичні, відкрито помилкові і жартівливі. Нереальні ідеї виконують важливу роль, стимулюючи генерацію інших ідей. Погані

ідеї, як каталізатори, необхідні для народження хороших. На підсумку багато пропозицій може виявитися марними, але сам процес повинен викликати потік ідей, які неперервно виникають і взаємно доповнюють одна одну. Колективний розум допомагає створювати послідовність пропозицій. Кожна ідея розглядається не більше двох хвилин і записується до протоколу без обґрунтування.

3) Під час генерації ідей важливо уникати будь-якої форми критики, як словесної, так і прихованої, такої як скептичні посмішки, жести та інше. Учасники мають установити відкриті та доброзичливі відносини під час штурму. Ідеї повинні підхоплюватися та розвиватися в інших учасників.

4) Експертиза і відбір ідей після завершення генераційного процесу вимагає особливо уважності. Усі ідеї, навіть ті, які вважаються несерйозними, нереальними або абсурдними, повинні бути ретельно розглянуті під час оцінки.

5) Керівник "штурму" відповідає за керування процесом рішення завдань. Він повинен виконувати свої обов'язки без наказів та критики, направляючи роботу у потрібне русло. Керівник ставить різні питання, іноді надає поради чи уточнення, не перериваючи при цьому бесіду. Важливо також слідкувати за тим, щоб ідеї висловлювались не тільки в раціональному напрямку.

6) Якщо задача не вирішена під час штурму, можна повторити процес рішення, краще з іншим колективом. Під час повторного сеансу з тим самим колективом слід обговорити проблему в іншому аспекті або в більш широкому формулюванні, роблячи її невідомою для сприйняття як нової задачі, що сприяє новому напрямку думок.

Для стимулювання процесу генерації ідей під час сесії штурму рекомендується використовувати певні методи, які вже вдаються при проектуванні виробів. Серед таких методів можна вказати "інверсію",

"аналогію" і "фантазію". Керівник також може скористатися списками контрольних питань, які були запропоновані, наприклад, А. Осборном та іншими авторами (див. розділ 3.3).

*Синектика*, що є однією з найефективніших методик творчості, розроблена американським винахідником і дослідником В. Дж. Гордоном. Він розпочав свої дослідження в цьому напрямку в 1944 році, вивчаючи діяльність винахідницької групи з високою продуктивністю. Згодом (в період з 1952 по 1959 рік) він представив власну методику [9].

Слово "синектика" у перекладі з грецької мови означає "сполучення різнорідних елементів". У повному словнику англійської мови це визначається як "синектичні групи — це групи людей різних спеціальностей, які об'єднуються для пошуку творчих рішень проблем за допомогою необмеженого тренування уяви і поєднання несумісних елементів". Синектика включає утворення постійних груп (оптимальний розмір 5-7 осіб) з представників різних спеціальностей, які навчаються винахідницьким прийомам. Бажано, щоб кожен учасник мав кілька різних професій.

Теоретичною основою синектики є твердження, що творчий процес можна пізнати і раціонально організувати, творчі процеси окремої особи і колективу схожі, ірраціональний елемент важливіший у творчості, і в латентному (схованому) стані існує багато творчих здібностей, які можна виявити і стимулювати. Сесії синекторів організуються за принципами мозкового штурму, але вони відрізняються використанням психологічних методів налаштування, зокрема активного використання аналогій [8, 9].

### **3.5. Морфологічний аналіз**

Морфологічний аналіз був розроблений Ф. Цвіккі в 1942 році, швейцарським астрономом. За допомогою методу морфологічного ящика [18, 20], який є найбільш дослідженим серед усіх методів морфологічного аналізу, вчений здійснив швидке отримання значної кількості оригінальних технічних рішень у сфері ракетобудування. Морфологічний аналіз опередив еру системних досліджень і виступив яскравим прикладом системного підходу до винаходів.

Згідно з Ф. Цвіккі, предметом методу морфологічного ящика є загальна проблема (технічна, наукова, соціальна і т.д.). Він вважає, що точне формулювання проблеми автоматично висвітлює найважливіші параметри, від яких залежить її вирішення, і кожен такий параметр може мати низку можливих значень [9, 20]. Будь-яке поєднання значень параметра розглядається як принципово можливе. Основний принцип методу полягає в систематичному дослідженні всіх можливих варіантів, що впливають з закономірностей будови (морфології) системи, яка удосконалюється.

Морфологічний метод дослідження застосовувався до численних систем. За словами Ф. Цвіккі, понад 70 великих промислових фірм використовували його для розв'язання різних науково-технічних завдань. В результаті застосування свого методу Ф. Цвіккі створив ряд оригінальних винаходів, включаючи балістичні пристрої, оригінальні силові установки, вибухові речовини, метод комбінованої фотографії і інше.

Суть аналізу полягає в виділенні кількох характерних структурних або функціональних морфологічних ознак у технічній системі, що удосконалюється. Кожна ознака може характеризувати, наприклад, конструктивний вузол системи, її функцію або режим роботи, тобто параметри чи характеристики системи, від яких залежить рішення проблеми і досягнення основної мети.



Для кожної окремо виділеної морфологічної ознаки генерується перелік її різноманітних конкретних варіантів та альтернатив. Ці ознаки з відповідними альтернативами можна структурувати у вигляді таблиці (морфологічного ящика), що дозволяє краще охопити пошукове поле. Проходячи всі можливі комбінації альтернативних варіантів виділених ознак, можна виявити нові способи вирішення завдань, на які при простому переборі можна було не звертати уваги.

Метод передбачає проведення робіт на п'ятьох етапах [29]:

*Точне формулювання задачі, яка підлягає вирішенню.* Якщо початково ставиться питання про одну конкретну систему, метод автоматично розширює пошук на всі можливі системи з аналогічною структурою, що узагальнює відповідь на більш загальне запитання. Наприклад, якщо потрібно дослідити морфологічний характер всіх видів транспортних засобів і запропонувати нову ефективну конструкцію для транспортування по снігу (снігохода).

*Складання списку всіх морфологічних ознак, тобто всіх важливих властивостей і параметрів об'єкта, від яких залежить вирішення проблеми і досягнення головної мети.* Точне формулювання проблеми і визначення класу досліджуваної системи дозволяє виявити основні властивості і параметри, які полегшують пошук нових рішень. Наприклад, морфологічними характеристиками для транспортного засобу (снігохода) можуть бути: а - двигун, б - привід, с - опора сидіння водія, d - рульове управління, е - опора тощо.

*Можливі варіанти кожної морфологічної ознаки (характеристики)* описуються шляхом створення матриці. Кожна характеристика (параметр, морфологічна ознака) має k різних варіантів, незалежних характеристик і специфічних форм. Наприклад, варіанти снігоходів: а1 - двигун внутрішнього згорання, а2 - газова турбіна, а3 - електродвигун і т.д.; б1 - пропелер, б2 - вантажівка, б3 - лижі, б4 - снігохід і т.д.; в1 - опора снігової kabіни, в3 - двигун, в4 -

привід і т.д. Поєднання однієї з можливих варіацій морфологічної характеристики з іншою дає одне з можливих технічних рішень.

Якщо ми побудуємо  $n$ -вимірний простір (де  $n$  - кількість морфологічних ознак) і відкладемо всі можливі варіанти на кожній осі, що відповідає одній з ознак, ми отримаємо "морфологічну коробку" (гарна назва для тривимірного простору, тобто трьох ознак), де кожна точка, визначена  $p$  координатами, містить одне можливе технічне рішення.

*Визначення функціональної цінності всіх отриманих варіантів рішень представляє собою найбільш відповідальний етап даного методу. Щоб уникнути заплутування серед великої кількості рішень та деталей, оцінка їхніх характеристик повинна проводитися на універсальній і, за можливості, простій основі, хоча це завдання не завжди є простим.*

Необхідно розглянути всі  $N$  варіантів рішень, що виникають зі структури морфологічної таблиці, і порівняти їх за одним або декількома ключовими показниками, які є найважливішими для даної технічної системи.

*Вибір найбільш раціональних конкретних рішень визначається на основі отриманих результатів порівняння. Знаходження оптимального варіанту може проводитися на основі кращого значення найважливішого показника технічної системи.*

Морфологічний аналіз служить основою для системного мислення в термінах основних структурних ознак, принципів і параметрів, забезпечуючи високу ефективність його застосування. Цей метод є систематичним засобом вивчення, що дозволяє досягти загального огляду всіх можливих рішень даної великомасштабної проблеми. Він будує мислення таким чином, що генерує нову інформацію, що стосується тих комбінацій, які при безсистемній діяльності можуть залишатися непоміченими.

Хоча внутрішньо властивий морфологічному способу мислення погляд, що всі рішення можуть бути реалізовані, при цьому багато з них можуть виявитися відносно тривіальними. Однак використання морфологічного аналізу ускладнюється відсутністю практичного та універсального методу оцінки ефективності конкретних варіантів рішень. Якщо такий метод існував би, теоретично можна було б обирати оптимальні комбінації елементів для кожного проекту, враховуючи тільки теоретичні розрахунки. Таким чином, процес винаходження був би замінений прямим аналізом альтернативних варіантів з використанням ЕОМ. Зазвичай, характеристики пристрою, для якого покладено основу раніше невідомої комбінації елементів, залишаються нечіткими.

### **3.6. Узагальнений евристичний метод**

Колектив лабораторії математичних методів оптимального проектування Марійського політехнічного інституту (Росія) розробив узагальнений евристичний метод або алгоритм. Це стало можливим завдяки проведенню наукового аналізу більше 30 відомих методів пошуку технічних рішень та активізації та раціональній організації творчої діяльності [2, 18].

Розроблена методика включає в себе ряд розробок авторів, а також раціональні прийоми та процедури з інших відомих методів, таких як морфологічний ящик, функціональне винахідництво, організовуючі поняття і інші. Це поєднання робить методику досить повною і універсальною, придатною для розв'язання різних завдань у багатьох галузях техніки.

В таблиці 3 наведені основні етапи узагальненого методу та виконувані процедури щодо задач проектування технічних виробів [6].

Таблиця 3 — Етапи й процедури узагальненого евристичного методу

Найменування й призначення етапу	Процедури
<p><i>Етап 1 Попереднє визначення проблеми. Формулювання функцій розроблюваної технічної системи.</i></p>	<p>1.2 Формулювання функцій продукту на кількісному рівні.                      1.3 Вибір існуючих виробів, які найкращим чином виконують сформульовані функції.                      1.4 Підготовка переліку недоліків існуючих продуктів.                      1.5 Формулювання попередньої постановки задачі.                      1.6. Формулювання проблеми без використання спеціальної термінології.</p>
<p><i>Етап 2: Вивчення та аналіз проблеми</i></p>	<p>2.1 Побудова дерева структурної еволюції класу технічних виробів (систем), що розглядається.                      2.2 Виявлення тенденцій розвитку аналізованих класів продуктів.</p>

	<p>2.3 Збір та аналіз інформації про передбачуваний розвиток досліджуваного класу продукції.</p> <p>2.4 Виявлення основних факторів, що мають визначальний вплив на розвиток досліджуваного об'єкта та основних класів виробів.</p> <p>2.5 Виявлення можливостей поліпшення окремих характеристик функції.</p> <p>2.6 Ранжування дефектів за важливістю та складністю усунення.</p>
--	---

Найменування й призначення етапу	Процедури
<p>Вивчення еволюції технологічних систем і тенденцій розвитку технологічних систем класів, функціонально близьких до досліджуваного продукту, з метою виявлення можливостей поліпшення окремих функціональних показників.</p>	<p>2.7 Виявлення причин виникнення дефектів в існуючих технічних виробках.</p> <p>2.8. оцінка можливості об'єднання цілей вирішення проблеми (виявлення взаємодоповнюючих, взаємосуперечливих і взаємозалежних цілей).</p> <p>2.9. визначення реалістичності постановки проблеми на сучасному рівні розвитку науки, техніки та виробництва</p> <p>2.10. аналіз умов досягнення цілей та виявлення позитивних і негативних факторів, що сприяють або перешкоджають досягненню цілей.</p> <p>2.11. Встановити ієрархічну структуру технічного продукту (системи) та встановити</p>

	<p>зв'язки між елементами досліджуваного продукту та іншими спорідненими об'єктами.</p> <p>2.12. Перевірити можливість задоволення потреб шляхом внесення змін до суміжних об'єктів.</p> <p>2.13. Оцінювати ступінь придатності для виконання поставленого завдання в даний час і в осяжному майбутньому.</p> <p>2.14. Генерувати ідеї максимально можливих технічних рішень для класу продуктів, що розглядаються.</p>
--	---

Найменування й призначення етапу	Процедури
<p><i>Етап 3 Уточнення та деталізація постановки задачі. Включити до переліку вимог експлуатаційні, конструктивні, технічні, ремонтні, економічні та ін. вимоги з їх якісною оцінкою.</i></p>	<p>3.1. скласти перелік вимог до існуючих технічних продуктів, які найкраще виконують сформульовані функції.</p> <p>3.2. підготувати перелік вимог до технічних продуктів, що розробляються.</p> <p>3.3. порівняти перелік вимог з показниками основних класів технічних виробів.</p> <p>3.4. виявити вимоги, які не можуть бути свідомо змінені при вирішенні задачі.</p> <p>3.5. виявлення помилкових вимог шляхом аналізу та експертного оцінювання та вилучення їх зі списку.</p> <p>3.6. Визначення основних вимог до продукту, що розробляється.</p> <p>3.7. Виявлення нових вимог, яких немає в існуючих аналогічних технічних продуктах.</p> <p>3.8. Визначення входів і виходів.</p>

	<p>3.9 Визначення параметрів.</p> <p>3.9 Визначення функціональних зв'язків між вхідними та вихідними параметрами.</p> <p>3.10. Виявлення невідповідностей у вдосконаленні продукту. 3.11. Побудова діаграм протиріч у вдосконаленні.</p> <p>3.11. Вибір найбільш важливих для вирішення проблеми і найбільш складних для усунення протиріч удосконалення.</p>
<p><i>Етап 4. Дослідження технічних ідей, рішень і принципів фізичної дії. Синтез розширеного набору нових технічних і фізичних принципів дії, з яких вибираються найкращі рішення. Всі етапи</i></p>	<p>4.1 Перетворення найближчого рішення існуючого технологічного продукту в бажане технологічне рішення.</p> <p>4.2 Перетворення найкращого світового стандарту в бажане технічне рішення</p> <p>4.3. перетворення майже досконалого технічного продукту в бажане рішення. 4.4. трансформувати задумане дизайнерське рішення в бажане технічне рішення</p> <p>4.5. трансформація аналогічних рішень майстер-класів у бажане рішення.</p>

Назви та цілі етапів процедури	Процедури
<p>Назви та призначення етапів цієї процедури. 4.9 - 4.11 виконуються з активним використанням евристичних прийомів (розділ 2.4).</p>	<p>4.6. перетворення застарілих або колись забракованих продуктів, що фактично використовуються, у бажане рішення</p> <p>4.7. зміна ієрархічної системи більш високого рівня.</p> <p>4.8. вирішувати проблеми шляхом усунення причин дефектів у прототипах.</p> <p>4.9. використовувати методи морфологічних</p>

	<p>таблиць.</p> <p>4.10. формулювання нових принципів фізичної дії для технічного виробу (системи) та його основних елементів.</p> <p>4.11. використання методів асоціативного вінка та метафори.</p>
<p><i>Етап 5. Вибір найкращого технічного рішення. Комплексний аналіз та оцінка всіх знайдених технічних рішень.</i></p>	<p>5.1 Перевірка рішень на фізичну та технічну здійсненність.</p> <p>5.2 Перевірка відповідності рішення основним вимогам.</p> <p>5.3 Категоризація технічних рішень за фізичними принципами роботи, основними конструктивними, технічними та іншими характеристиками,</p> <p>5.4. класифікація рішень за їх експлуатаційними та іншими характеристиками</p> <p>5.4. вибір найбільш економічного варіанту,</p> <p>5.5. вибір найбільш економічного варіанту, який вирішує поставлену задачу з найменшими витратами, включаючи матеріальні, експлуатаційні та технічні витрати; 5.5. за основними показниками вибір найбільш економічного варіанту, який вирішує поставлену задачу з найменшими витратами</p> <p>5.5. вибір технічних рішень, які за ключовими показниками не поступаються кращим світовим аналогам</p> <p>5.6. вибір технічного рішення з найбільшою питомою вагою стандартних деталей та вузлів</p> <p>5.7. вибір найбільш повного рішення</p> <p>5.8. вибір рішення, яке найкращим чином</p>



	усуває основні протиріччя або найкращим чином реалізує сформульовані функції, що поліпшують технічний продукт.
--	--

Найменування й призначення етапу	Процедури
<p><i>Етап 6.</i>  <i>Доопрацювання обраного технічного рішення.</i>  <i>Розробка, подальше доопрацювання, експериментальна та пілотна апробація технічного рішення.</i></p>	<p>6.1 Перевірка відповідності найкращого рішення повному переліку вимог.          6.2. трансформація неприйнятних рішень у прийнятні.          6.3. визначення можливих змін у відповідних технічних продуктах по всьому комплексу, включаючи продукти, що знаходяться на стадії розробки.          6.4. визначення оптимальних значень основних параметрів найкращого технічного продукту.          6.5. ранжування кращих рішень за сукупністю критеріїв якості.          6.6. підготовка технічних креслень, проведення експериментів та пілотних випробувань найкращого рішення.          6.7. виявлення дефектів технічного рішення після експериментальних випробувань.</p>
<p><i>Етап 7. Аналіз техніко-економічних показників знайдених рішень та оцінка можливості їх впровадження.</i></p>	<p>7.1. оцінка очікуваних ефектів від використання отриманих технічних рішень;          7.2. оцінка перспективності знайдених рішень; 7.3. визначення сфер практичного застосування та перспектив їх впровадження;          7.4. аналіз техніко-економічних показників.</p>

	<p>7.3. визначення напрямів комерціалізації та ринків збуту.</p> <p>7.4. оцінка очікуваного економічного ефекту відповідно до обсягів реалізації нового технологічного продукту.</p> <p>7.5. підготовка заявки на винахід.</p>
--	--

На четвертому етапі узагальненого методу, який спрямований на пошук ідей і рішень, крім процедур пошуку, активно використовуються евристичні прийоми, які визначені в розділі 2.4. Під евристичним прийомом розуміється короткий настановницький опис, який вказує, як можна трансформувати відоме технічне рішення (прототип), щоб отримати нове технічне рішення, або як можна синтезувати нове рішення.

### **3.7. Інші методи пошуку технічних рішень**

Існують й інші методи з раціональними аспектами (див. Таблицю 2). Зокрема, групи можна ідентифікувати на основі комбінаторного підходу, який в цьому відношенні нагадує морфологічний аналіз. До таких методів належать метод організації понять, "матриця відкриттів" та десяткова матриця пошуку [18].

Метод організації концептів, розроблений Ф. Хансеном у 1953 році, за своєю суттю є найбільш близьким до морфологічного ящика і складається з декількох етапів [28].

- 1) Ідентифікація організуючих концептів та їх відмінних рис.
- 2) Класифікація регулятивних концептів відповідно до їхньої важливості.
- 3) Візуальне порівняння регулятивних концептів з їх характерними ознаками і, на основі цього, підготовка сітки всіх можливих рішень, що відповідають обраним обмеженням.

4) Оцінка характеристик з точки зору їх відповідності конкретним вимогам завдання.

5) Поєднання характеристик різних організаційних концепцій для створення рішення.

Метод організуючих понять відрізняється від морфологічного ящика у створенні керівних матеріалів для конкретного класу задач, графічному представленні організуючих понять і їх ознак, а також класифікації ознак за важливістю для раціонального обмеження варіантів рішень.

Метод "матриць відкриття", який був запропонований А. Модем (Франція) у 1955 році, має деяку схожість із морфологічним аналізом. Зводячи суть методу до простого, він передбачає створення таблиці, в якій перетинаються два ряди характеристик. Однак, в той час як у морфологічному аналізі всі вибрані характеристики стосуються конструкції технічного об'єкту, у цьому методі деякі з них можуть відноситися, наприклад, до умов споживання, виробництва, експлуатації і т. д. (матриця: потреби замовника — можливості підрядника). Сам по собі метод не дає закінчених рішень, але він створює можливість для асоціацій, висуває нові проблеми, які іншим методом можливо б не було враховано.

Існує безліч варіантів матриць, включаючи якісні та кількісні, що використовують матричні методи математики. Прямокутні матриці дозволяють перетинання двох різних рядів характеристик, тоді як квадратні дозволяють перетинання ряду з самим собою.

Найчастіше цей метод використовується для систематизації наявного матеріалу і надає стартові точки для подальших досліджень, виявляючи наявні резерви.

Метод десяткових матриць пошуку, розроблений Р.П. Повилейко, передбачає пошук нових технологічних рішень на основі

аналізу результатів систематичного застосування десяти евристик до кожного з десяти базових показників технологічної системи [22].

Основні групи показників технічної системи включають:

- Геометричні (довжина, ширина, висота, площа і т. д.).
- Фізико-механічні (вага, міцність, корозійна стійкість, еластичність і т. д.).
- Енергетичні (вид енергії, коефіцієнт корисної дії і т. д.).
- Конструкційно-технологічні (технологічність, транспортабельність, складність і т. д.).
- Надійність і довговічність.
- Експлуатаційні (продуктивність, точність, стабільність параметрів і т. д.).
- Економічні (собівартість, трудові витрати на виробництво і експлуатацію, втрати і т. д.).
- Ступінь стандартизації і уніфікації.
- Зручність обслуговування і безпека (шум, вібрації, освітленість, температура і т. д.).
- Художньо-конструкторські (гармонійність, масштабність і т. д.).

Для зміни основних показників використовують різноманітні евристичні прийоми, включаючи:

*Неологія:* впровадження нових значень основних показників технічних об'єктів в дану галузь техніки.

*Адаптація:* пристосування відомих процесів, конструкцій, форм, матеріалів та їхніх властивостей до конкретних умов.

*Мультиплікація:* збільшення основних показників, наприклад, через збільшення кількості робочих органів, робочих позицій або кількості одночасно оброблюваних деталей.

*Диференціація:* розчленування, поділ і очищення основних показників.

*Інтеграція:* з'єднання, змішування і зближення основних показників.

*Інверсія:* зміна порядку на протилежний, поворот, вивертання і т.д.

*Імпульсація:* впровадження імпульсних змін в показники технічних об'єктів.

*Динамізація:* зміна в часі ваги, температури, розмірів, кольору та інших показників.

*Аналогія:* пошук і використання подібності в показниках між даним технічним об'єктом і відомими об'єктами.

*Ідеалізація:* наближення показників технічного об'єкта до ідеальних.

Ця класифікація дозволяє створити десяткову матрицю пошуку, де рядки відображають основні показники, а стовпці відображають основні групи евристичних прийомів. Кожна клітина цієї матриці відповідає певній зміні одного з параметрів об'єкта та може бути вихідною точкою для нових технічних рішень або асоціацій, що активізують процес пошуку ідей рішення.

Комбінаторний принцип також використовується на різних етапах методики семиразового пошуку, розробленої Г.Я. Бушем, що включає стратегічну та тактичну частини. Методика розподіляє всі етапи процесу пошуку рішення на 7 частин, пов'язаних зі здатностями людського мозку сприймати та обробляти інформацію. Стратегічна частина включає аналіз проблемної ситуації, суспільних потреб, функцій аналогів та прототипу, постановку задачі, генерацію ідей, вибір евристичних засобів, конкретизацію ідей, оцінку варіантів і вибір оптимального, спрощення, розвиток і реалізацію рішення. Тактична частина включає числові прийоми, також використовуючи концепції "сім ключових слів" і таблиці, аналогічні десятковим матрицям пошуку, але розміром 7x7 [9].

Методика систематичної евристики, яка отримала широке визнання в Німеччині, представляє інтерес серед програмних (алгоритмічних) методик пошуку нових технічних рішень. Розроблена під керівництвом І. Мюллера, вона успішно використовується в науково-дослідних та навчальних організаціях [9, 18].

Ця методика спрямована на раціоналізацію роботи інженерів, конструкторів і науковців і містить комплекс програм, розроблених на основі системного підходу та евристичного програмування. Це дозволяє використовувати їх у процесах конструювання та проектування.

Функціонально-вартісний аналіз є методикою раціоналізації, спрямованою на вдосконалення конструкцій і процесів з метою зниження вартості та витрат, переважно без зміни основних принципів. Застосування цієї методики дозволяє знизити вартість виробів на 5–20%.

Оскільки близько 75% витрат на виробництво продукції припадає на етап досліджень і розробок, важливо не понести зайвих витрат на цьому етапі. Тому завдання функціонально-вартісного аналізу вирішуються шляхом точного визначення функцій і характеристик системи продукту, її компонентів і розробки проектних рішень на основі цих функцій і характеристик [21].

Функціонально-вартісний аналіз, як правило, проводиться постійно діючою дослідницькою групою, що складається з дизайнерів, інженерів та економістів. Робота за цією методологією виконується згідно з робочим планом у такій послідовності

*Підготовчий етап:* вибір теми дослідження та визначення цілей аналізу. Підготовка переліку джерел інформації. Планування, обговорення та затвердження плану аналізу об'єктів дослідження.

*Інформаційний етап:* збір оптимального обсягу інформації для визначення характеристик і структури об'єкта дослідження та аналогічних об'єктів. Систематизація та вивчення інформації для ідентифікації об'єкта та визначення його фактичного стану. Визначення виробничих та експлуатаційних витрат на об'єкт та його складові. Виявлення найбільш затратних частин аналізованого об'єкта.

*Аналітичний етап:* аналіз і уточнення функцій, визначення основних і допоміжних функцій досліджуваного об'єкта і його складових. Виокремлення та аналіз витрат, пов'язаних з функціями. Порівняння функцій і витрат компонентів та їх аналогів. Розробка пошуку резервів економії в аналізованому об'єкті відповідно до функціональної області. Створення завдань для пошуку нових ідей і варіантів оптимальних рішень.

*Творчий етап:* уточнення напрямку та цілей пошуку нових рішень. Організація та проведення зустрічей для визначення тем та висування ідей. Обробка та систематизація результатів зустрічей для подальшої оцінки. Підготовка документації для оцінки результатів функціональними відділами.

*Дослідний етап:* систематизація запропонованих варіантів нових рішень. Пропозиції, які є явно нездійсненними, відсіюються, а ті, що залишилися, оцінюються. Дослідження різних можливостей реалізації роботи запропонованих варіантів і, за необхідності, проведення експериментальних випробувань. Оцінка реалістичності пропозицій з точки зору логістики, фінансів та виробничого забезпечення. Визначення вартості та ефективності виконання функцій у різних варіантах рішень. Ранжування варіантів і вибір найкращого.

*Рекомендаційний етап:* підготовка пропозицій щодо реалізації обраного рішення. Узгодження пропозицій зі стейкхолдерами та винесення на обговорення керівництва. Обговорення та прийняття

рішень щодо рекомендацій. Розробка та затвердження програми впровадження рекомендацій.

*Етап впровадження:* організація роботи з впровадження рекомендацій. Управління процесом виконання програми. Впровадження результатів, отриманих на виробничій фазі. Оцінка результатів та порівняння з історичними даними.

У додатку 2 представлено універсальний метод [17] основних правил системного проектування на прикладі проектування та розробки яхт. Ця методика відрізняється наявністю стратегій і правил компоновання елементів технічного продукту (системи).

### **3.8 Вейвлет-корекція графічних зображень у мультимедійних технологіях.**

Останнім часом активно вдосконалюються системи цифрової реєстрації, обробки та передачі графічних зображень різного призначення, таких як схеми, креслення, тексти, документація та рекламна продукція. Оптичні зображення графічної інформації, що знаходиться на різних носіях — від паперу до полімерів, складаються з кількох компонент.

Перша компонента — інформаційна — містить безпосередню топографічну інформацію. Друга компонента — фоновая — утворюється світлорозіятним фоном, який може погіршувати контраст графічної інформації та спотворювати її топографічну структуру. Фонова компонента, як правило, виникає через оптично-неоднорідні поля двох типів.

Перший тип — це координатно-неоднорідні розподіли інтенсивності розсіяного світла паперовими носіями в площині графічного зображення. Другий тип — це координатно-неоднорідні розподіли станів (азимут та еліптичність) розсіяного світла полімерними носіями.



Одним із актуальних завдань для поліпшення якості графічних зображень є розробка методів інструментально-оптичної диференціації таких компонент. На сьогоднішній момент відомі методи реєстрації оптичної інформації не вирішують цю проблему.

Ефективним підходом до поліпшення якості графічних зображень може бути використання методики масштабно-селективного вейвлет аналізу. Таким чином, актуальним є розробка нових оптичних і поляризаційних методів обробки графічних зображень, використовуючи масштабно-селективну вейвлет фільтрацію для виділення інформаційної та фонові компонент.

### **3.9 Наукове дослідження можливостей Фур'є корекції графічних зображень**

В останні роки спостерігається активний розвиток систем цифрової реєстрації, обробки та передачі графічних зображень різної природи – від схем і креслень до текстів, документації та рекламної продукції. Оптичні зображення графічної інформації на різних носіях, від паперу до полімерів, складаються з кількох компонент.

Перша компонента – інформаційна – містить безпосередню топографічну складову. Друга компонента – фонові – формується світлорозсіяним фоном, що може погіршувати контраст графічної інформації та спотворювати її топографічну структуру. Фонові компонента, зазвичай, виникає внаслідок оптично-неоднорідних полів двох типів.

Перший тип – це координатно-неоднорідні розподіли інтенсивності розсіяного світла паперовими носіями в площині графічного зображення. Другий тип – це координатно-неоднорідні розподіли станів (азимут та еліптичність) розсіяного світла полімерними носіями.

Для розвитку методів поліпшення якості графічних зображень стоїть завдання інструментально-оптичної диференціації таких компонент. На сьогоднішній момент існуючі методи реєстрації оптичної інформації не вирішують цю проблему.

Одним із ефективних підходів до поліпшення якості графічних зображень може бути методика узгодженої просторово-частотної фільтрації, яка використовує пряме та зворотне Фур'є-перетворення параметрів оптичного поля [8]. Цей новий підхід ґрунтується на просторово-частотній фільтрації різноманітних зображень топографічної інформації на різноманітних носіях.

Алгоритмічна реалізація даного методу включає такі узгоджені аналітичні або інструментальні етапи:

- "пряме Фур'є-перетворення";
- "просторово-частотна фільтрація";
- "зворотне Фур'є-перетворення" лазерних зображень.

Таким чином, важливим є розробка нових оптичних і поляризаційних методів обробки графічних зображень з використанням узгодженої просторово-частотної фільтрації для виділення інформаційної та фонові компонент.

З урахуванням великого різноманіття графічних зображень, їхньої практичної невивченості та складності оптичної і поляризаційної структури, стає очевидною необхідність у розробці більш універсальних методик картографування. Ці методи повинні надавати можливість статистично достовірно вивчати структуру об'єктів, враховуючи набір механізмів світлорозсіяння паперовими носіями і оптичної анізотропії полімерних підкладок.

Одним із важливих напрямків поліпшення якості графічних зображень може бути застосування основних алгоритмів фур'є-оптики у методиках оптичного зчитування (картографування) топографічної інформації. Такі аналітичні підходи дозволяють здійснювати

інструментальну операцію узгодженої просторово-частотної фільтрації графічних зображень, що представляють собою координатні (двовимірні) розподіли параметрів (інтенсивності та станів поляризації) поля розсіяного випромінювання. У результаті цього виникає аналітична або інструментальна можливість відокремленого дослідження різномасштабних розподілів інформаційних і фонових параметрів графічного зображення.

Для вирішення цих завдань потрібні наступні аналітичні кроки:

1. Розроблення моделі матеріальних носіїв (підкладок) графічної інформації, яка обґрунтовує формування та трансформацію поляризаційних мап азимута та еліптичності графічних зображень та їхніх фур'є-спектрів.

2. Встановлення взаємозв'язків між координатними розподілами азимута та еліптичності фур'є-спектрів поляризаційно-неоднорідних графічних зображень і параметрами лінійного та циркулярного двопробеневого заломлення полімерних носіїв.

3. Розроблення нового аналітичного і інструментального методу фур'є-поляриметрії просторово-частотних спектрів графічних зображень.

### **Питання для самостійного контролю**

- 1) Перелічіть класифікаційні групи існуючих методів пошуку рішень при проектуванні нових технологічних продуктів.
- 2) Що ви знаєте про методи пошуку нових технологічних рішень?
- 3) У чому полягає сутність методу асоціативного пошуку? Перелічіть методи, пов'язані з методом асоціацій.
- 4) Особливості методу контрольованого опитування Який перелік запитань є найбільш поширеним?
- 5) Опишіть методи психологічної активізації колективної творчої діяльності.
- 6) З якою метою застосовуються методи прямого та зворотного мозкового штурму?
- 7) Які правила проведення методу мозкового штурму?
- 8) Відмінності між методами синектики та мозкового штурму.
- 9) Особливості морфологічного аналізу як системного підходу у сфері винахідництва. Робочі етапи морфологічного аналізу.
- 10) Назвіть основні етапи проектування технічного продукту з використанням узагальнених евристик.
- 11) Які методи, засновані на морфологічному аналізі, ви знаєте?
- 12) Особливості функціонально-вартісного аналізу.
- 13) Стратегії та правила компоновання елементів технічного виробу на основі системного підходу.

## **РОЗДІЛ 4 МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ**

У цьому розділі наведено огляд інтегрованих систем проектування виробів та їхніх можливостей у вирішенні інженерних завдань при дослідженні конструкції виробу. Подається загальне уявлення про метод скінчених елементів, який використовується в інтегрованих системах для проведення інженерних розрахунків. Розглядаються можливості комп'ютерної системи COSMOS у здійсненні інженерних розрахунків на етапі проектування технічних виробів.

### **4.1. Загальні відомості щодо інтегрованих систем проектування виробів**

На сьогодні існує різноманітність систем та програм для 3D-моделювання в машинобудуванні, які відрізняються за своїми можливостями, ступенем узагальнення, математичними методами, які використовуються, якістю інтерфейсу та рівнем сервісу. У додатку А наведено список найбільш популярних систем.

Застосування інформаційно-комп'ютерних технологій на етапах створення та виробництва виробів дозволяє підвищити якість, зменшити витрати та скоротити час підготовки виробництва.

Ці технології відомі як CALS-технології (Computer-Aided Logistics Support), які забезпечують керування життєвим циклом виробу на всіх етапах від розробки концепції до утилізації.

Класифікацію інформаційних технологій, які використовуються на етапах проектування та виробництва, можна здійснити за такими класами:

*CAD/CAM* (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) – системи автоматизованого проектування та виготовлення виробів (Catia, Unigraphics, ProEngineer, PowerSOLUTION, SolidWorks, Sprut, Компас, T-FLEX та інші);

*CAE* (Computer-Aided Engineering) – системи автоматизованого інженерного аналізу деталей і машин (Nastran, Ansys, Compas та інші);

*PDM* (Product Data Management) – системи автоматизованого керування базами даних щодо виробу (IMAN, Optegra, Enovia та інші);

*Project Management* – автоматизовані системи керування процесом проектування та системи планування (WorkFlow, DocFlow і Project Planning);

*MRP* (Material Requirements Planning) – автоматизовані системи керування виробництвом (SAP R/3, BAAN, Галактика та інші).

Сучасні інтегровані системи проектування включають засоби для конструкторсько-технологічного проекту, аналізу та прочностного розрахунку, керування підприємством та супроводу виробу в експлуатації. Наприклад, у системі UNIGRAPHICS використовуються CAD для автоматизованого проектування, CAM для автоматизованого виробництва та CAE для інженерних розрахункових досліджень.

В систему CAE входить пакет прикладних програм ANSYS, що забезпечує проведення дослідницьких та проектних розрахунків взаємодіючи з іншими системами. Система CADD5 має такі засоби:

*CADD5/OPTEGRA* – конструкторсько-технологічний проект;

*PATRAN/NASTRAN* – аналіз та розрахунок міцності;

*SAPR3* – керування підприємствами;

*Windchill* — супровід виробу в експлуатації.

Багато інтегрованих систем проектування, як правило, не мають вбудованих модулів аналізу та розрахунку міцності і користуються універсальними модулями чи модулями інших систем. Найбільш поширеними універсальними модулями для аналізу та

розрахунку міцності є PATRAN/NASTRAN, ANSYS та COSMOS, який розглядається в розділі 4.4.

Розрахунковий пакет PATRAN/NASTRAN (NASA Structural Analysis) входить до складу інтегрованої системи проектування CADD5 і є одним з найбільш потужних та розгалужених для проведення досліджень. Роботи з його створення були розпочаті у 1964 році. Розрахунковий пакет ANSYS входить до складу інтегрованої системи проектування CAD/CAM/CAE UNIGRAPHICS і створювався у 80-і роки. Розрахунковий пакет COSMOS був розроблений у 80-і роки компанією Structural Research & Analysis Corp (SRAC), яка поставляє на ринок цілий ряд програмних продуктів для розв'язання інженерних задач у різних галузях промисловості, науки та освіти. Цей пакет широко використовується в різних інтегрованих системах автоматизованого проектування. Усі ці пакети призначені для інженерних і науково-дослідних розрахунків, забезпечуючи розробку технічних виробів (систем).

Вони схожі за ідеологією своєї побудови, використовуваними математичними моделями і методами реалізації, а також переліком розв'язуваних задач, що дозволяє взаємний обмін даними та результатами розрахунків.

Всі вказані пакети, в їхній універсальній конфігурації, дозволяють вирішувати різні класи задач:

- Визначення переміщень, деформацій і напружень в конструкції технічних виробів при статичних впливах (лінійна статика).
- Розрахунок стійкості конструкцій.
- Визначення напружено-деформованого стану конструкції з використанням нелінійних моделей (фізична та геометрична нелінійність).
- Напружено-деформований стан при контакті твердих тіл.

- Напружено-деформований стан елементів конструкцій з тріщинами.
  - Аналіз частот і форм власних коливань конструкцій.
  - Динамічний гармонічний аналіз і випадкова реакція - оцінка поведінки конструкцій у відповідь на зовнішні багатотональні або випадкові удари.
  - Динамічні перехідні процеси - розрахунок часової поведінки конструкцій при дії нестационарних зовнішніх навантажень.
  - Аналіз втомного руйнування конструкцій.
  - Аналіз стаціонарної та нестационарної гідродинаміки.
  - Аналіз електромагнітних процесів.
  - Сталі та перехідні нелінійні теплові процеси - визначення розсіювання теплового потоку, аналіз температурних полів і деформацій.
  - Визначення чутливості будь-яких результатів аналізу до зміни розрахункових параметрів.
  - Багатокритеріальна оптимізація з одночасним використанням різних типів обмежень.
  - Методи статичної конденсації для субструктур.
  - Адаптивний аналіз напружень.
- В основі побудови математичних моделей в цих пакетах лежить метод скінчених елементів. Ідея методу полягає в тому, щоб моделювати реальний об'єкт як сукупність скінчених елементів (одномірних, двовимірних, тривимірних), виконуючи умови їх з'єднання, напруги, закріплення та аналізу напружено-деформованого стану такої скінчено-елементної моделі. Алгоритм розв'язання завдань за допомогою пакетів САЕ виглядає наступним чином:
- Створіть геометричну модель технічного виробу або системи (або експортуйте цю модель з модуля CAD).



- Виберіть тип скінченного елемента з бібліотеки пакету для кожної області конструкції виробу.
- Задайте властивості матеріалу для кожної області розрахунку.
- Вкажіть геометричні властивості (в залежності від обраного типу елемента) елементів в розрахунковій області, наприклад, товщину елементів оболонки або площу поперечного перерізу елементів балки.
- Розділіть конструкцію на скінченні елементи для створення скінченно-елементної моделі.
- Перевірте точність скінченно-елементної моделі та внесіть корективи, наприклад, об'єднайте вузли, що перекриваються, або перенумеруйте вузли та елементи.
- Стабілізуйте скінченно-елементну модель, наприклад, встановивши нульові або постійні переміщення у вузлах.
- Навантаження моделі (зосереджені та розподілені навантаження) на вузли, лінії та поверхні.
- Передавати дані скінченно-елементної моделі в модуль Калькулятор, якщо розрахунки виконуються в різних модулях.
- Розрахунок скінченно-елементних моделей, створених в окремих модулях калькулятора, в залежності від типу задачі.
- Відображення та інтерпретація результатів розрахунку (дисплей або вихідний файл).

Сучасні пакети CAE дозволяють створювати моделі, що складаються з півмільйона елементів, при цьому розраховувач вирішує системи більш ніж 5 мільйонів лінійних рівнянь, що потребує значних обсягів пам'яті й швидкодії. У розділі 4.2 детальніше розглядаються методи, використовувані при рішенні інженерних задач у пакетах CAE.

## **4.2 Методи рішення інженерних задач на етапі проектування технічних виробів і систем**

Різні програми використовують різні методи для моделювання фізичних процесів, які охоплюють напружено-деформований стан твердих тіл, рух і теплообмін рідкого середовища. У цьому підрозділі, з погляду загальної теорії, розглянуті метод скінчених елементів, метод скінчених об'ємів і методи оптимізації при вирішенні інженерних задач [1, 5, 26].

#### **4.2.1 Основи методу скінчених елементів**

На сьогоднішній день метод скінчених елементів (МСЕ) вважається стандартом для вирішення задач механіки твердого тіла за допомогою числових алгоритмів. МСЕ здобув популярність завдяки своїй здатності моделювати широкий спектр об'єктів та явищ, включаючи більшість конструктивних елементів, вузлів і конструкцій, які виготовлені з різноманітних матеріалів різної природи. Однак при використанні цього методу, подібно до будь-якої числової апроксимації, питання відповідності між розрахунковою моделлю і реальністю є основним. Навіть при детальній документації програми аналізу залишаються, в певній мірі, чорними ящиками, що призводить до певної непередбачуваності результатів та неоднозначності їхньої інтерпретації. Таким чином, якість висновків, зроблених на основі отриманих результатів, залежить від кваліфікації користувача та його розуміння основ МСЕ, особливо у відношенні розрахунків на міцність. Для отримання докладнішої інформації щодо цього методу рекомендуються вказані джерела [10, 31]. У цьому розділі розглядається метод скінчених елементів з точки зору вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла.

##### **4.2.1.1. Поняття скінченого елемента**

Метод скінчених елементів (МСЕ) ґрунтується на дискретизації об'єкта для вирішення рівнянь механіки суцільного середовища. Припускається, що ці співвідношення виконуються в межах кожної елементарної області, яку називають скінченим елементом. Скінчені елементи можуть відповідати реальним областям простору, таким як просторові елементи, або математичним абстракціям, таким як елементи стрижнів, балок, пластин або оболонки.

У межах кожного скінченого елемента визначаються властивості області об'єкта, обмеженої цим елементом (наприклад, характеристики твердості, міцності матеріалу, об'ємна густина і т. д.). Поля потрібних величин, таких як переміщення, деформації, напруження і т. д. (в контексті механіки твердого тіла), описуються у межах скінченого елемента. Параметри з другої групи призначаються у вузлах елемента, і потім використовуються інтерполяційні функції, які дозволяють обчислити відповідні значення в будь-якій точці усередині елемента або на його границі. Математичне описання елемента полягає в тому, щоб зв'язати діючі фактори вузлів, що, зазвичай, включає переміщення та зусилля у механіці суцільного середовища.

Розглянемо прямий метод формування рівнянь, які пов'язують ці фактори в межах скінченого елемента за умови лінійної залежності.

1. Поле переміщень  $A$  у межах елемента за допомогою інтерполяційних функцій (у так званих ізопараметричних скінчених елементах, використовуваних, зокрема, в *COSMOSWorks*, вони ідентичні функціям форми), зібраних у матрицю  $[N]$ , виражається через вузлові переміщення  $\{\Delta\}$ .

У матричному виді співвідношення мають вигляд:

$$\Delta = N \cdot \{\Delta\} = N \cdot [u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, \dots, u_k, v_k, w_k],$$

де  $k$  — число вузлів скінченного елемента.

2. Визначається поле деформацій  $\varepsilon$ , яке виражається за ступенями свободи  $\{\Delta\}$  за допомогою диференціювання поля переміщень (інтерполяційних функцій) відповідно до співвідношень, зібраних у матрицю  $[D]$ , що зв'язує деформації з переміщеннями:

$$\varepsilon = [D] \cdot \{\Delta\}.$$

3. З урахуванням рівнянь стану, в основі яких лежить закон Гука й коефіцієнти яких утворюють матрицю  $[E]$ , устанавлюється зв'язок спочатку між полем напруг і полем деформацій:

$$\sigma = [E] \cdot \varepsilon,$$

а потім і між напругами й ступенями свободи у вузлах:

$$\sigma = [E] \cdot [D] \cdot \{\Delta\},$$

4. Визначаються функціональні залежності для сил  $[F]$ , що діють використан у вершинах ням матриці ел

перетворення менту, залежно на пр увід г у в пуозловіля н силиапру  
 $\{F\} = [A] \cdot \{\sigma\}$  : с

$$\{F\} = [A] \cdot \{\sigma\},$$

5. Взаємозв'язок вузлових сил і переміщень у вузлах має вигляд:

$$\{F\} = [k] \cdot \{\Delta\},$$

де  $[k] = [A] \cdot [E] \cdot [D]$  - матриця жорсткості скінченного елемента.

6. Для надання матриці  $[k]$  властивості симетрії домагаємося заміни матриці перетворення жорсткості матрицею, транспонованої до матриці перетворення переміщень у деформації

$[D]$ . Тоді:

$$[k] = [D]^T \cdot [E] \cdot [D].$$

Вказані взаємозв'язки дозволяють отримати сили, враховуючи переміщення у вузлах, і також вирішити обернену задачу: при відомих силах знайти переміщення, а потім визначити деформації та напруження в межах скінченного елемента.

Пряме формулювання застосовується, зазвичай, для визначення матриць жорсткості скінчених елементів стрижнів, балок та пластин, а також для опису процесів теплопровідності.

Для отримання матриць жорсткості просторових елементів часто використовуються варіаційні принципи, такі як принцип мінімуму потенційної енергії. Одержана у такий спосіб матриця жорсткості з пункту 6 буде обчислюватися як:

$$[k] = \int_V [D]^T [E] [D] dx dy dz$$

Проблема інтегрування за об'ємом тіла складної форми або ж, у випадку оболонкових елементів, — по криволінійній поверхні вирішується за рахунок того, що функціональну залежність записують в локальній системі координат, пов'язаної з елементом  $\xi, \psi, \eta$ , причому координати змінюються в інтервалі  $[-1, +1]$ . При цьому вираження для елементарного об'єму набуває виду:

$$dx dy dz = [J] d\xi d\psi d\eta,$$

де  $[J]$  — визначник матриці Якобі. Тоді:

$$[k] = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} [D]^T [E] [D] \det [J] d\xi d\psi d\eta$$

Аналітичний розрахунок інтегралів для матриці жорсткості є неможливим навіть у випадку трикутників із криволінійними сторонами. Тому вдаються до чисельного інтегрування, що включає заміну інтеграла сумою добутків підінтегральних функцій, обчислених у точках Гауса або в іншій системі точок з відповідними ваговими коефіцієнтами. Цей процес вимагає розрахунку величини визначника Якобі. Негативне значення є результатом виродженості

конкретного скінченного елемента. Зазвичай інформація про цю обставину міститься в діагностичних повідомленнях програм.

#### 4.2.1.2. Алгоритм методу скінчених елементів

Маючи необхідні математичні інструменти для отримання матриць жорсткості скінчених елементів та приведення навантажень до сил у вузлах, а також для розв'язання оберненої задачі щодо обчислення полів деформацій і напружень в межах скінченного елемента на основі переміщень у вузлах, можна сформулювати алгоритм методу скінчених елементів (МСЕ). Наведемо один із варіантів такого алгоритму для вирішення задач за умови лінійної залежності.

1) Об'єм деталі дискретизується, тобто створюється скінченно-елементна сітка; для 3D-об'єктів область розбивається на тетраедри з гранями, що апроксимуються лінійними або параболічними функціями координат. Для моделей поверхонь використовуються плоскі (лінійні) або криволінійні (параболічні) трикутники.

2) Для просторових скінчених елементів ступені свободи визначаються як переміщення вздовж осей локальної системи координат елемента. У випадку оболонкових скінчених елементів до трьох переміщень у кожному вузлі додаються три кути повороту навколо тієї ж осі нормалі до центральної площини, яку апроксимує елемент.

3) Визначити залежності для перерахунку переміщень і кутів повороту у вузлах в глобальну систему координат.

4) Розрахувати матрицю жорсткості скінченного елемента. Рівняння для розрахунку компонентів матриці жорсткості скінченного

елемента включають координати вузлів, модуль пружності матеріалу і коефіцієнт Пуассона.

5) Отримана матриця жорсткості переноситься з локальної системи координат елемента в глобальну систему координат.

6) Матриця жорсткості, представлена в глобальній системі координат, поєднується з глобальною матрицею жорсткості  $[K]$ .

7) Статичні та кінематичні граничні умови трансформуються у навантаження та переміщення у вузлах, представлених у глобальній системі координат, і додаються до послідовності сил  $[F]$ .

8) Отримана система лінійних рівнянь  $[K] \cdot [\Delta] = [F]$  розв'язується відносно послідовності переміщень. Це найбільш трудомісткий етап розрахунку. Для розв'язання використовуються ітераційні або прямі методи.

9) Для кожного скінченного елемента, враховуючи переміщення у вузлових точках (кут повороту) та апроксимуючу функцію, обчислюється деформація. Якщо елемент лінійний, деформація всередині елемента постійна; якщо елемент параболічний, деформація змінюється лінійно. Залежно від деформації обчислюються напруження в елементі. При необхідності (програмна функція) відбувається усереднення напружень у вузлах сусідніх елементів і перерахунок напружень в кожному елементі.

10) На основі компонентів напружено-деформованого стану і параметрів міцності матеріалу розраховуються еквівалентні напруження за критеріями міцності.

#### 4.2.1.3. Врахування нелінійності в процедурах МСЕ

Досить часто, модулі нелінійного аналізу у САЕ програмах є розширенням базової частини, яка відповідає за пружний статичний розрахунок. Давайте розглянемо кілька аспектів реалізації цих процедур [13, 19, 32]. Нелінійні задачі визначаються нелінійною залежністю між впливовими факторами та реакцією системи на них.



Крім того, граничні умови, такі як навантаження та переміщення, часто змінюються в часі. Для врахування цього явища вводиться поняття кривої часу (у COSMOSWorks - часова крива). Суть полягає в тому, що вводиться параметр з часовими одиницями, і в залежності від його значення призначаються умови (сила, напруга, переміщення і т.д.). Якщо об'єкт має матеріал, властивості якого можуть змінюватися з часом, то параметр відображає фізичний час.

У протилежному випадку він є абстрактною величиною, масштаб якої вибирається для зручності представлення кривих (реальний час використовується також у задачах динаміки, але COSMOSWorks не надає такої функціональності). Головною вимогою при описі зовнішніх факторів є синхронність їхньої дії. Наприклад, якщо на об'єкт, виготовлений з матеріалу із властивістю фізичної нелінійності, спочатку діє одна сила, а потім, після її припинення, інша, то перший фактор розміщується в одному інтервалі, а другий - в наступному. Тривалість цих інтервалів може бути різною. Навпаки, якщо сили фактично застосовуються одночасно, їх слід розмішувати в одному і тому ж відрізьку часу.

Наступна необхідна процедура для модифікації алгоритму МСЕ для вирішення нелінійних задач - це управління збереженням системи у стані рівноваги. Більшість прикладних програм використовують три методи для різних класів задач.

*Метод сил (Force Control)*, коли після збільшення навантажень відповідно до кривої часу на величину певного кроку визначаються переміщення, що задовольняють рівнянню рівноваги. Зазвичай метод сил застосовується для задач з фізичною нелінійністю матеріалів. Алгоритм не є придатним для моделювання систем, що знеміцнюються (коли збільшення переміщень відбувається без збільшення силових факторів).

*Метод управління переміщенням* (Displacement Control) передбачає вибір параметра часу для заданого збільшення переміщень, що визначає силові фактори, які діють у цей момент. Цей алгоритм слід використовувати в ситуаціях, де можлива геометрична нелінійність поведінки конструкції. Але він непридатний для обчислювальних схем, де деформація конструкції при застосуванні граничних умов переміщень на певному етапі супроводжується зменшенням сил, породжених цими переміщеннями. Один із варіантів цього явища - проклацання тонкостінних об'єктів при втраті стійкості.

*Метод довжини дуги* (Arc Length Method), відомий як метод продовження за найкращим параметром, включає автоматичне введення параметра продовження, який входить у додаткове рівняння та враховується в рівнянні рівноваги. Цей метод ґрунтується на тому, що на кожному кроці вздовж безлічі можливих рішень, враховуючи інформацію щодо рішень, отриманих на попередніх кроках. Цей алгоритм слід застосовувати для аналізу критичної поведінки конструкцій, коли після втрати стійкості відбувається проклацання, і система переходить в новий стан рівноваги.

Під час вирішення задач, які містять нелінійності, потрібно визначити ітераційний алгоритм для розв'язання системи нелінійних рівнянь у процесі навантаження. Його функція полягає в корекції параметрів, що описують стан системи, після кожного кроку збільшення навантаження. Якщо застосувати додаткове навантаження та на основі параметрів жорсткості, які відповідають рівню деформацій, діагностованих на попередньому кроці, розрахувати зусилля у вузлах, то можна обчислити невідповідність між прикладеними та одержаними силами. Потім слід розпочати дії для мінімізації цієї невідповідності. Найбільш популярні два алгоритми.

*Метод Ньютона-Рафсона* вимагає побудови дотичної матриці жорсткості на кожній ітерації під час будь-якого кроку збільшення

навантаження. Сам алгоритм має квадратичну швидкість збіжності та високу стійкість. Однак необхідність побудови та розкладання матриці жорсткості вимагає значних обчислювальних ресурсів.

*Модифікований метод Ньютона-Рафсона*, на відміну від оригіналу, побудовує дотичну матрицю жорсткості один раз на кожному кроці збільшення навантаження, а потім використовує її на всіх субітераціях у межах кроку. Цей алгоритм, хоча вимагає більше ітерацій, заощаджує час за рахунок зменшення операцій з матрицею жорсткості.

Ще одна група алгоритмів визначає момент завершення ітерацій як у межах кроку збільшення навантаження, так і у момент завершення цих збільшень. Це є специфічним аспектом, і тому на цьому етапі рекомендується експериментально визначити відповідні параметри. Важливо зазначити, що в залежності від алгоритму управління ітераційним процесом (метод сил, переміщень, довжини дуги) використовуються критерії збіжності, такі як переміщення, неврівноважені навантаження або баланс енергії.

#### 4.2.2. Методи оптимізації в інженерному аналізі

Основною метою інженерної діяльності є створення конструкцій, які вважаються "найкращими". Ця задача розв'язується за допомогою різноманітних інструментів. По-перше, це виконання робіт відповідно до встановлених нормативів і стандартів, які враховують досвід "попередніх поколінь". Ці джерела накопичені шляхом систематизації досвіду, експериментального випробування і, іноді, розробників стандартів можуть мати аргументи, які може бути складно зрозуміти. Тим не менш, у більшості випадків дотримання нормативів є найбільш надійним шляхом. Крім того, конструктори використовують інженерну інтуїцію, практичні навички і досвід

попередніх розробок для досягнення успішних результатів. Іноді цей підхід дозволяє отримати хороші результати, особливо коли розглядаються концептуальні аспекти та алгоритми генерації нових знань, незважаючи на прогрес у деталях. Ще одним способом створення високоефективних продуктів є використання алгоритмів оптимального проектування. Зрозуміло, що найбільш ефективним є комбінування всіх доступних засобів.

Для отримання систематичних знань в галузі оптимального проектування рекомендується звертатися до літератури [11, 23].

#### 4.2.2.1. Алгоритми оптимізації

Алгоритми оптимізації можна розділити на параметричні та ті, що пов'язані з аналізом чутливості. Параметрична оптимізація спрямована на вибір змінних, які описують геометрію (це є найбільш поширеним випадком), властивості матеріалів, параметри армування матеріалів тощо.

З іншого боку, аналіз чутливості передбачає отримання форми об'єкта, яка задовольняє визначеним вимогам. Важливою відмінністю між методами є те, що параметрична оптимізація передбачає опис форми об'єкта за допомогою певних параметрів, які потім використовуються для конструювання об'єкта. Геометрична модель будується, а потім здійснюються необхідні розрахунки, причому інформація про параметри проектування використовується тільки на етапах пошуку оптимального рішення та формування моделі.

Методи аналізу чутливості, навпаки, передбачають, що об'єктом пошуку є сама форма об'єкта. Наприклад, якщо аналізується пластина на згин, то це може бути товщина всіх скінчених елементів, на які розбивається пластина. Для проектування ферми (споруди зі скріплених стрижнів) параметрами можуть бути перетини стрижнів, що утворюють розрахункову модель. Алгоритми аналізу чутливості є

вбудованими в спеціалізовані скінчено-елементні програми та є досить складними для експлуатації.

Параметрична оптимізація краще відповідає потребам інженерних завдань, оскільки пошук здійснюється в обмеженому просторі, а межі параметрів можуть бути визначені на практичних підставах. Крім того, наступне пристосування розмірів до нормального ряду чисел, як правило, має невеликий вплив на якість проекту. Параметрична оптимізація стала більш доступною завдяки використанню параметричних систем геометричного моделювання, таких як SolidWorks. Наприклад, SolidWorks, маючи розроблені алгоритми для опису та зміни форми, конфігураційні інструменти, рівняння апарату, процедури контролю геометричної реалізованості, легко інтегрується з інструментами оптимізації COSMOSWorks, де розміри є змінними параметрами.

Ще однією ключовою обставиною для поєднання методів чисельного аналізу та оптимізації виявився розвиток препроцесорів у програмах САЕ. Препроцесор отримав завдання автоматизованої побудови сітки і реалізації граничних умов. Крім того, потужність як програмних, так і апаратних засобів на сьогоднішній день настільки велика, що методи чисельного аналізу можуть використовуватися паралельно з алгоритмами оптимізації, у той час як раніше переважно застосовувалися аналітичні рішення.

#### 4.2.2.2. Базові поняття задачі умовної оптимізації.

Задача умовної оптимізації (або нелінійного програмування) мають наступне формулювання:

мінімізувати цільову функцію  $f(x)$ , де  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$  —  $N$ -мірний вектор, компоненти якого є дійсними

числами, називаються змінними проектування й варіюються в інтервалах:  $x_i^{(L)} < x_i \leq x_i^{(U)}$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

за умови дотримання обмежень-нерівностей:

$g_j(x) \geq 0$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ;  $h_k(x) = 0$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots, K$ .

Слово "умовна" в назві завдання вказує на те, що існують обмеження на змінні проектування. Якщо відсутні будь-які обмеження, включаючи обмеження на діапазон змінних величин проектування, тоді оптимізація називається безумовною.

У межах допустимої області функція може мати кілька мінімумів. Глобальний мінімум - той, де функція має найменше значення, відмінний від локальних мінімумів.

Намагаючись уникнути ускладнень, пов'язаних з обмеженнями, деякі обмеження намагаються виключити, наприклад, шляхом зменшення кількості незалежних змінних проектування.

Існує велика кількість алгоритмів для розв'язання задач умовної оптимізації. Більшість з них для цільової функції з лінійними або нелінійними обмеженнями можна розподілити на дві групи: методи прямого пошуку (особливо актуальні для інженерних розрахунків) і процедури, які використовують похідні.

Методи чисельного аналізу можуть використовуватися разом з алгоритмами оптимізації завдяки розвитку препроцесорів у програмах САЕ. Препроцесор автоматизує побудову сітки і реалізацію граничних умов.

Проблеми вирішення задачі умовної оптимізації стають видимими через негладкість або розривність цільової функції та обмежень, а також через проблему неоднозначності та локальної нестійкості рішення при використанні чисельних методів.

Методи прямого пошуку менш чутливі до локальних негладкостей і розривів у цільовій функції та обмеженнях. Таким чином, можна зробити висновок, що удосконалені алгоритми, застосовані для розв'язання жорстко обмежених задач, можуть бути більш продуктивними. Ці алгоритми ґрунтуються на строгих критеріях оптимальності і дозволяють отримати "точне" рішення. Однак існує ймовірність того, що за певних обставин процедура, якщо вона не використовується разом із МКЕ або аналогічним вирішувачем, може не надати правильного результату. У таких випадках методи, що не вимагають обчислення похідних, можуть дозволити отримати, можливо, не оптимальний, але "кращий" результат порівняно зі вихідним варіантом. Ступінь "поліпшення" залежить від математичної основи алгоритму та від дослідника, який управляє процесом.

Багато алгоритмів умовної оптимізації базуються на методах безумовної оптимізації. Для цього часто використовується заміна задачі, введення додаткового члена у цільову функцію, що відображає "ступінь" порушення обмежень. Такі алгоритми відомі як *методи бар'єрних та штрафних функцій*. У методі бар'єрних функцій функція зростає при наближенні до обмежень всередині припустимої області та досягає нескінченності на активних обмеженнях. У методі штрафних функцій додаток дорівнює нулю всередині та на границі припустимої області, але зростає при виході за її межі. Для задач з негладкою цільовою функцією та нелінійними обмеженнями ефективними є *недиференційовані штрафні функції*, такі як стала штрафна функція, що фактично є нескінченним бар'єром. Проте цей підхід може призводити до зациклення, оскільки він не враховує участі неприпустимих точок у подальшому аналізі.

Другий варіант — використання абсолютної функції штрафу. По суті, даний вид штрафу — це сума абсолютних величин відхилу

порушених обмежень. Виразення для результуючої функції має вигляд:

$$f(x, \rho) = f_0(x) + \rho \sum_{i \in I} c_i(x),$$

де:  $f$  — функція з урахуванням штрафу;  $f_0$  — початкове значення цільової функції;  $\rho$  — параметр штрафу;  $c(x)$  — вектор порушених у точці  $x$  обмежень;  $I$  — число порушених обмежень.

Виникає запитання щодо того, яким параметром штрафу слід користуватися. Теоретично він повинен враховувати характеристику зміни вихідної цільової функції. Наприклад, якщо функція швидко зменшується біля лінії обмеження, "невеликий" штраф може бути недостатнім для компенсації цього зменшення, і програма може продовжити пошук за межами припустимої області. З іншого боку, якщо штраф "занадто" великий, можуть виникнути проблеми, що характерні для абсолютних штрафів. Отже, використання методів прямого пошуку разом із зовнішніми штрафними функціями також пов'язане із певним суб'єктивізмом, і отримані результати не завжди відповідають очікуванням. Наприклад, можна припустити, що в основі модуля оптимізації COSMOSWorks лежить описаний далі алгоритм. Таким чином, у ситуаціях, коли програма виявляє умовний оптимум на одному чи декількох обмеженнях, можливий "невеликий" вихід за межі припустимої області.

#### 4.2.2.3. Алгоритм методу комплексів

Розглянемо уніфікований алгоритм, також відомий як полієдричний метод, що базується на задачі умовної оптимізації, яка перетворюється на задачу безумовної оптимізації за допомогою алгоритму абсолютної штрафної функції. Метод ґрунтується на тому,



що з початкової точки, яка повинна бути допустимою, випадковий пошук генерує кількість додаткових точок, що дорівнює кількості змінних плюс один. Ці точки утворюють у просторі багатогранник. Вибирається найгірша з усіх вершин (з максимальним значенням штрафної модифікованої цільової функції). Потім знаходиться нова тестова точка шляхом відображення найгіршої вершини відносно центру тяжіння інших вершин. Для цього використовується коефіцієнт відображення  $a$ , умовно обраний рівним 1.3. Якщо тестова вершина порушує обмеження, накладені на діапазон вимірюваної змінної, вона визначається як така, що знаходиться найближче до центру ваги інших вершин з обмеженнями. Якщо вона залишається гіршою, ніж на попередній ітерації, коефіцієнт відбиття зменшується вдвічі. У процесі роботи розмір комплексу зменшується, так само як і його деформація. Зокрема, тривала взаємодія з обмеженням призводить до втрати розміру комплексу, коли обмеження "скручується", що заважає йому продовжувати рух у "перспективному" напрямку після проходження певної частини шляху вздовж активного обмеження.

Приведемо формалізований опис алгоритму відповідно до [23].

Є припустима початкова точка  $x^0$ , інтервали змінення

змінних  $x_i^{(L)}$ ,  $x_i^{(U)}$ , коефіцієнт відбиття  $a$  і параметри закінчення

обчислень.

*Крок 1.* Побудова початкового комплексу, що складається з  $P$  припустимих точок. Для кожної точки  $p = 1, \dots, P-1$ :

1. Імовірнісним методом визначити координати  $x^p$  в

інтервалі між  $x_i (L)$  і  $x_i(U)$ .

2. Якщо  $x^p$  – неприпустима точка, знайти центр ваги  $X$  уже знайдених точок

$$x_p = x_p + 0.5 \cdot (X - x_p),$$

повторювати процедуру доти, поки  $x^p$  не стане припустимою.

3. Якщо  $x^p$  – припустима точка, повторювати п. 1 доти, поки не буде  $p = P-1$ .
4. Обчислити  $f(x^p)$  для  $p = P - 1$ .

*Крок 2. Відбиття комплексу:*

1. Серед всіх вершин комплексу вибрати найгіршу точку  $x^R$ , для якої

$$f(x^R) = \max f(x^p),$$

і привласнити змінній  $F_{\max}$  значення  $f(x^R)$ .

2. Знайти центр ваги  $X$  інших точок і нову пробну точку:  $x^m = X - x^R \cdot \alpha$

Далі можливі наступні варіанти:

- якщо  $x^m$  – припустима точка й  $f(x^m) \geq F_{\max}$ , те зменшити у два рази відстань між  $x^m$  і центром ваги  $X$  і продовжувати пошук, поки  $f(x^m) < F_{\max}$ ;
- якщо  $x^m$  – припустима точка й  $f(x^m) < F_{\max}$ , перейти до кроку 4;
- якщо  $x^m$  – неприпустима точка, перейти до кроку 3.

*Шаг 3. Коректування комплексу для забезпечення влучення вершини в припустиму область.*

1. Якщо  $x_{im} < x_i^{(L)}$ , покласти  $x_{im} = x_i^{(L)}$ , якщо  $x_{im} > x_i^{(L)}$ , покласти  $x_{im} = x_i^{(L)}$ ,

покласти  $x_i^m = x_i^{(L)}$ , причому при зменшенні або збільшенні однієї з координат пробної крапки, інші повинні зменшитися або збільшитися пропорційно.

2. Якщо  $x^m$  – неприпустима точка, зменшити у два рази відстань від пробної точки до центра ваги й продовжувати так доти, поки  $x^m$  не потрапить у припустиму область.

*Крок 4. Перевірка умов закінчення обчислень:*

1. Визначити  $F = \frac{1}{P} \sum_{p \in X} f(x^p)$  і  $X = \{x^p\}$ .

2. Якщо  $\sum_{p \in X} (f(x^p) - F) \leq \varepsilon$  і  $\sum_{p \in X} (x^p - x^m) \leq \delta$  обчислення

припинити й уважати, що оптимум знайдений; у противному випадку перейти до пункту 1 кроку 2.

*Кінець алгоритму.*

У деяких реалізаціях алгоритму пункт 2 кроку 2 (це відповідає ситуації, коли пробна точка виявилася краще найгіршої) виглядає в такий спосіб: Якщо  $x^m$  – припустима точка й  $f(x^m) < F_{\max}$ , те:

- серед всіх вершин комплексу вибрати найкращу точку  $x^w$ , для якої

$$f(x^w) = \min_{p \in X} f(x^p),$$

$$= f(x^m)$$

і привласнити змінній  $F_{min}$   $x^m$ );

- якщо  $f(x^m) > F_{min}$ , т. е. нова точка не стала кращою, то перейти до кроку 4;
- якщо  $f(x^m) < F_{min}$ , т. е.  $x^m$  виявилася новою кращою точкою, то напрямок вважається "вдалим", після чого варто додатково визначити багатогранник;
- знайти "поліпшену" пробну точку  $x^e = X + \beta (x^r - X)$ , де  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) — коефіцієнт<sup>е</sup>)  $< f(x^m)$ , т. е. ування; розтяг ування увінчалася успіхом, — якщо  $f(x)$  привласнити  $x^m = x^e$ ;
- перейти до п. 1 кроку 4.

У цьому підрозділі було приведено тільки варіант одного з алгоритмів, що можливо реалізований в *COSMOSWorks*.

#### 4.2.2.4. Використання процедур оптимізації в системах САЕ

Конкретні втілення описаного алгоритму, такі як ті в *COSMOSWorks*, представлені як "чорні ящики", а їхня документація не містить інформації щодо методичних аспектів, що супроводжують ці алгоритми. Розглянемо алгоритм об'єднання умовної оптимізації та розрахункової програми в прикладному пакеті, наприклад, *COSMOSWorks*, застосовуючи наступні кроки:

##### *Крок 1:*

Створити геометричну модель *SolidWorks*. Система розмірів повинна бути організована так, щоб ті, які стануть змінними проектування, стали керуючими розмірами. Перевірити, щоб при введенні рівнянь не відбувалося зменшення незалежних розмірів, які стануть змінними проектування. Перевірити можливість перебудови

моделі при зміні розмірів, які будуть пов'язані зі змінними проектування.

*Крок 2:*

Створіть обчислювальну модель COSMOSWorks з необхідною кількістю вправ. Одна з них буде "джерелом" для цільової функції, а інші надаватимуть інформацію для обмежень (обмеження можуть бути згенеровані за результатами першої вправи). Перевірте можливість генерування сітки першої версії геометрії, як при зміні розмірів, пов'язаних зі змінними проектування.

*Крок 3:*

Виконайте всі розрахунки вправи, пов'язані з оптимізацією геометрії, що відповідає початковому дизайну. Перегляньте результати вправ, пов'язаних з обмеженнями. Оцініть гіпотетичні діапазони змін.

*Крок 4: Створіть вправу оптимізаційного типу:*

1. Визначте цільову функцію.
2. Призначте змінні проектування з параметризованих розмірів геометричної моделі.
3. Визначте діапазон, в якому потрібно змінювати змінні проектування. Переконайтеся, що початкова точка знаходиться в межах відповідного діапазону. Не рекомендується розміщувати початкову точку на межі поточної області.
4. Сформулюйте обмеження, які необхідно виконати, і переконайтеся, що не всі з них активні в початковій точці. Небажано, щоб початковий дизайн був на більш ніж одному обмеженні.
5. Встановіть параметри, які визначають процес завершення розрахунку. Встановіть реалістичне значення для максимальної кількості ітерацій.

*Крок 5: Запуск циклу оптимізації:*

1. якщо ви запускаєте цикл вперше, перейдіть до пункту 7 цього кроку.
2. Відновіть геометрію та перебудуйте сітку.
3. Виконайте всі вправи, пов'язані з формуванням обмежень та обчисленням цільової функції.
4. Виберіть активні обмеження та розрахуйте відхилення активних обмежень.
6. розрахувати цільову функцію.
7. якщо модель прийнята і досягнута збіжність, переходимо до кроку 6.
7. Виконайте оцінку нових значень змінних моделі.
8. Перехід до пункту 2 даного кроку.

*Крок 6:* Отримання покращеного проекту та завершення оптимізаційного циклу.

З використанням графіків, що відображають залежність змінних проектування, цільової функції та обмежень від номера ітерації, а також кривих тренда (графіків залежності цільової функції від змінних проектування), разом із здоровим глуздом, оцінюється, чи є конструкція умовно-оптимальною, чи зупинка алгоритму викликана іншими причинами.

Цей алгоритм є загальною схемою і не залежить від конкретних програмних реалізацій. Наприклад, питання про відповідність обмежень розглядається після побудови сітки, виконання розрахунків і отримання результатів. Частина обмежень, пов'язаних зі змінними проектування або їхніми комбінаціями, не вимагає виконання зазначених дій, і час виконання цих операцій є невеликим. Таким чином, виконання подальших операцій, які вимагають значно більше

ресурсів, є нерозумним, і краще відразу розпочати пошук кращого варіанта.

Щодо можливих проблем при використанні COSMOSWorks, слід зазначити, що в інженерній діяльності задача оптимізації зазвичай формулюється в двох основних варіантах. Перший передбачає мінімізацію маси при обмеженнях на максимальні напруження, деформації, переміщення, мінімальні власні частоти або мінімальні навантаження втрати стійкості, а також параметри геометрії. У цьому контексті алгоритм оптимізації COSMOSWorks досить ефективний у вирішенні поставленої задачі.

Однак існує ще один фундаментальний клас задач, де потрібно мінімізувати максимальні напруження (діагностовані у повному обсязі моделі) при обмеженнях на масу та розміри. Також ставиться задача, де критерієм є деформації та, часто, переміщення.

Вирішення цих проблем в COSMOSWorks без використання певних нестандартних та не завжди відтворюваних методів стає неможливим. Це враховуючи, що програма дозволяє контролювати резонансні характеристики та навантаження втрати стійкості. Проте накладати обмеження на масу або об'єм у будь-яких умовах неможливо.

Практичні приклади вирішення задач оптимізації в пакеті COSMOSWorks представлені в [5].

### **4.3. Можливості виконання інженерних задач із використанням пакета COSMOS**

#### **4.3.1. Призначення пакета**

COSMOSWorks – це програмний додаток до SolidWorks, спрямований на вирішення задач механіки деформованого твердого

тіла за допомогою методу скінчених елементів. Опис програми буде кратким, оскільки існує детальний посібник [5].

Розроблений фірмою Structural Research and Analysis Corporation (SRAC, США), яка наразі є підрозділом компанії SolidWorks, COSMOSWorks використовує геометричну модель деталі або складальної одиниці в SolidWorks для формування розрахункової моделі. Інтеграція з SolidWorks дозволяє мінімізувати операції, пов'язані з особливостями скінчено-елементної апроксимації. Граничні умови визначаються в контексті геометричної моделі, а процедури представлення результатів також володіють схожими особливостями.

Розвиток програми охоплює як збільшення обчислювальних можливостей, так і розширення функціональності, пов'язаної з імітацією розрахункових ситуацій, що виникають у повсякденній інженерній практиці. На даний момент утворився "пакет" із трьох продуктів: COSMOSWorks, COSMOSFloWorks та COSMOSMotion. COSMOSWorks може інтегрувати результати аерогідродинамічних або теплових розрахунків, виконаних в COSMOSFloWorks, а також навантаження руху, отримані в результаті динамічного аналізу в COSMOSMotion.

COSMOSWorks служить інструментом для "інженерного" аналізу, передбачаючи, що для професійного розраховувача необхідні більш спеціалізовані засоби. Проте практика показує, що більшість інженерних задач, розв'язаних чисельними методами, можуть бути вирішені за допомогою цієї програми. Рациональний інтерфейс та обмежена функціональність дозволяють інженерові зосередитися на проектуванні, не розсіюючись на деталі, характерні для "універсальних" пакетів. Зазвичай кваліфікація виконавця є основою для створення успішної конструкції, а розрахункові програми



використовуються для перевірки результатів та надають матеріал для подальших вдосконалень.

#### 4.3.2. Теоретична база

COSMOSWorks ґрунтується на методі скінчених елементів, та його теоретичні основи розглядаються в розділі 4.2. У цьому розділі ми розглянемо особливості його реалізації в даній програмі, які стосуються часто зустрічаються на практиці аспекти:

1) У COSMOSWorks використовуються два типи скінчених елементів: об'ємні ізопараметричні тетраедри та трикутні елементи оболонки. Обидва типи можуть мати лінійне або параболічне поле переміщень (постійну деформацію або лінійне поле деформацій). Тетраедри мають 4 або 10 вузлів, а оболонки — 3 або 6. Жодних інших типів елементів, таких як балки, стрижні, контактні елементи та інші, у програмі не існує.

2) Програма не дозволяє співіснування твердотільних та оболонкових скінчених елементів в одній моделі. Це серйозне обмеження, яке, в принципі, компенсується тим, що методика сполучення елементів різних типів також неоднозначна в універсальних пакетах МСЕ.

3) Контактні скінчені елементи в програмі відсутні в явному вигляді. Здогадки базуються на тому, що врахування відповідних граничних умов реалізується зміною глобальної матриці жорсткості системи.

4) Інші типи кінематичних граничних умов реалізуються шляхом безпосередньої зміни матриці жорсткості системи (у ранніх версіях програми використовувалися штрафні функції — "абсолютно" жорсткі допоміжні елементи, що призводило до помилок програми).

5) З'єднання контактних граничних умов типу входу в контакт і виходу з контакту в межах однієї збірки можливе, але результати іноді неадекватні ситуації.

6) Для розрахунку складальних одиниць у програмі реалізовані граничні умови, такі як *Дистанційне навантаження* (Remote Load), *Точно* (Rigid), *Шпилька* (Pin). Реалізація цих умов передбачає зміни матриці жорсткості системи, які фактично призводять до створення абсолютно жорсткого об'єкта в моделі. Це може призводити до теоретично нескінченних деформацій (напружень) у зоні взаємодії цього об'єкта з "реальними" деталями складальної одиниці, що, в свою чергу, впливає на відсутність збіжності рішення при ущільненні сітки та, ймовірно, на некоректність результатів.

7) У COSMOSWorks використовується р-адаптивний метод для побудови сітки скінчених елементів. Це означає, що в областях з високим градієнтом енергії деформації програма автоматично збільшує порядок полінома, який апроксимує поле переміщень у скінченому елементі. Однак при некоректній постановці кінематичних граничних умов можуть виникати особливості, такі як теоретично нескінченні деформації та напруження. Використання цієї опції для таких розрахункових моделей може призвести до абсурдних результатів.

8) В межах пружного аналізу COSMOSWorks дозволяє використання ортотропних матеріалів. Є можливість використання ортогонально-ортотропних матеріалів і, як окремий випадок, трансверсально-ізотропних матеріалів. Можливо визначення циліндричної ортотропії, але криволінійна ортотропія не підтримується. Призначення властивостей анізотропії неплоским оболонкам, формально, можливо, але результати для версій програми до 2005 року не є задовільними.

9) При оцінці міцності збірок за допомогою функції COSMOSWorks "Перевірка міцності" (Design Check Wizard), для всіх матеріалів використовується один і той самий тип критерію міцності. Застосування цієї функції для аналізу збірок, що містять деталі з крихких і в'язких матеріалів, може викликати проблеми.

10) Вбудований модуль оптимізації в COSMOSWorks ґрунтується на методі прямого пошуку з зовнішньою штрафною функцією, як це більш детально описано в розділі 4.2. Це забезпечує можливість збіжності до точки, яка перебуває поза припустимою областю біля одного чи декількох обмежень. Оптимізація за критерієм мінімуму/максимуму еквівалентної напруги в COSMOSWorks неможлива, оскільки, як вже описано (неможливо одночасного використання різних критеріїв міцності), оптимізація збірок, у яких деталі виготовлено з різних типів матеріалів, при обмеженнях на припустимі еквівалентні напруги викликає проблеми.

#### 4.3.3. Інтерфейс

COSMOSWorks інтегрований із стандартним інтерфейсом програми SolidWorks. Після активації COSMOSWorks у меню SolidWorks з'являється відповідний пункт (див. рис. 3). Справа від вікна SolidWorks з'являється *Менеджер COSMOSWorks* у вигляді дерева. Він містить позиції, які характеризують проект в цілому (піктограма з назвою деталі або збірки та піктограма "*Параметри*"), а також піктограми з "*Вправами*" (Studies), які з'являються після їх створення. Вправи представлені гілками, які об'єднують інформацію про конкретний розрахунок: матеріали, сітка, граничні умови, результати та звіти. Кожній піктограмі відповідає контекстне меню, вміст якого змінюється в залежності від поточного стану розрахункової моделі.

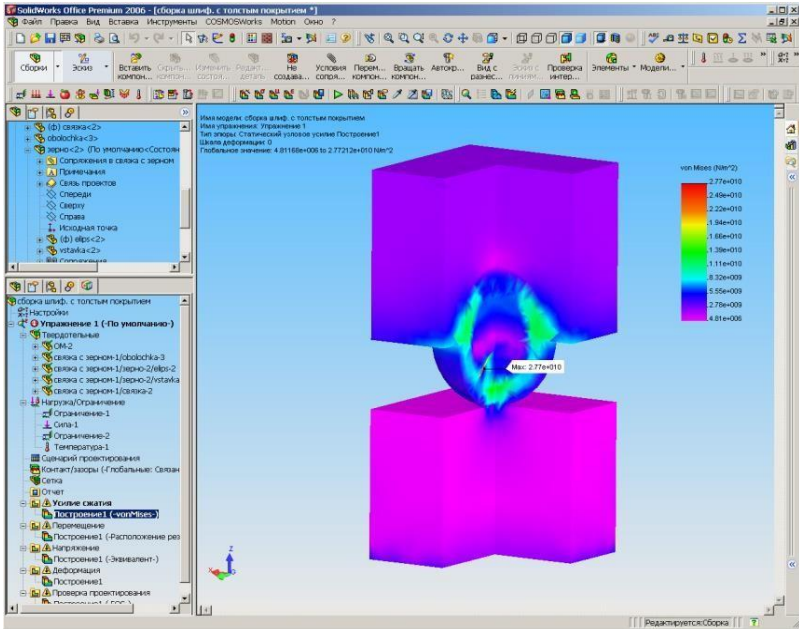


Рисунок 3 – Работа с пакетом *COSMOSWorks* в программе *SolidWorks*

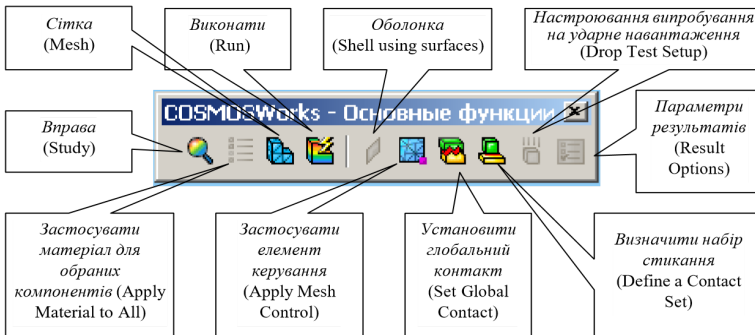


Рисунок 4 — Панель *Основні функції*

Розглянемо детальніше панель інструментів COSMOSWorks (Рис. 4-10).

Нижче описано функції команд на головній панелі функцій (Рис. 4).

Вправа Створить нові роботи, змініть параметри або видалить існуючі роботи.

Застосувати матеріал до всіх. Призначити матеріал до вибраного елемента у папці Solid або Shell або змінити властивості раніше призначеного матеріалу.

Сіть. Скінченно-елементна декомпозиція моделі відповідно до активної роботи. Налаштування сітки, Управління сіткою, Умови контакту перед створенням сітки.

(рекомендується поставити галочку в останньому пункті (тільки для досліджень типу статичного аналізу)).

Виконати Виконує розрахунок активного дослідження.

Shell Створює сітку на основі вибраної поверхні або поверхонь. У списку вибору можна вказати обидва типи об'єктів, але сіть, швидше за все, не буде зшита.

Застосувати елементи керування. Призначте параметри щільності сіті для вершин, дуг, поверхонь і, у випадку збірки, для деталі або об'єкта збірки, пов'язаного з деталлю. Для збірок густина може бути призначена тільки деталі або пов'язана з густиною, яка використовується програмою для окремої деталі. Щільністю не можна керувати за напрямком.

Встановити глобальний контакт. Встановлює граничну умову контакту на "глобальний". Контакт допускається в першому випадку зі спільним рухом, незалежним рухом і можливим роз'єднанням. Другий тип граничної умови слід використовувати, якщо існує ймовірність проковзування деталі. Цю команду можна використовувати тільки при роботі зі збірками в лінійному пружному аналізі або при розв'язанні задач, пов'язаних з фізичною нелінійністю

матеріалу. Вона також частково працює для теплових розрахунків. Для розрахунків стійкості, виділення власних частот і нелінійного аналізу можливий тільки спільний рух деталей.

Визначте множини зіткнень. Призначайте контактні граничні умови, відмінні від загальноприйнятих для взаємодіючих пар об'єктів або вибраних деталей. На додаток до граничних умов, описаних в попередніх параграфах, контактні умови можуть бути призначені для пар поверхонь.

Налаштування випробування на ударне навантаження. Визначте параметри для імітації падіння. Ви можете вибрати висоту падіння і швидкість падіння. Задайте орієнтацію і коефіцієнт тертя поверхні, на яку падає об'єкт. Напівобласть, на яку "падає" модель, вважається абсолютно жорсткою. Після аналізу розв'язується контактна задача зі змінними межами.

Параметри результату. Задає параметри відображення результатів обраного руху. Ця команда доступна тільки після розрахунку.

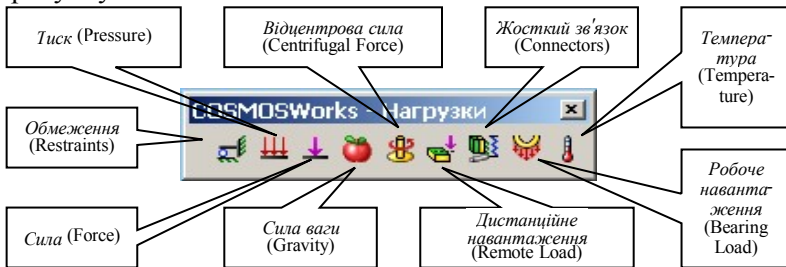


Рисунок 5 — Панель *Навантаження*

Функціонал команд панелі навантаження описано нижче.

Обмеження. Визначає граничні умови для елементів моделі, вибраних в активній механічній вправі (тип аналізу: статичний, на власну частоту, на стійкість, нелінійний).

Тиск. Застосовує тиск до поверхонь, вибраних у вправі активної механіки.

Сила. Застосовує силу, крутний або згинальний момент до об'єкта моделі, вибраного в активній механічній вправі. Вказана сила застосовується до кожного вибраного об'єкта.

Сила тяжіння. Регулювання гравітаційних (частіше інерційних) навантажень для активних механічних вправ.

Відцентрова сила. Налаштування відцентрової сили для активних механічних вправ.

Дистанційне навантаження. Застосування дистанційних навантажень для активних механічних вправ.

Жорсткі з'єднання тіл. Введення віртуальних об'єктів для імітації кріплень.

- Жорстке тіло - вводить абсолютно жорстке тіло, що з'єднує площини двох частин.

- Пружини - розмістити "розподілені" пружини розтягування і стиснення або пружини зсуву (можливо, попередньо натягнуті) між плоскими поверхнями двох деталей. - Штифт - повинен включати повністю жорсткий штифт, що з'єднує концентричні отвори в двох частинах. Штифт може забезпечувати обертання або осьове зміщення деталі із заданою жорсткістю.

- Еластична опора - імітує гнучку опору, яка обмежує рухливість певної грані деталі. Опора може мати нормальну і зсувну жорсткість.

- Болти - представляють гнучкі об'єкти, що імітують поведінку попередньо затягнутих болтів. Останні можуть бути задані в термінах осьової сили або крутного моменту. В останньому випадку для розрахунку сили потрібен коефіцієнт тертя. Болт може бути з'єднаний з деталями, що з'єднуються, за допомогою віртуальних гвинтів та/або

імітованих шайб. Робоче навантаження. Прикладання контактного навантаження до поверхні, обраної для активного механічного руху.

Температура. Визначає температуру об'єкта, обраного для активної вправи, тип аналізу якого - Тепловий або Статичний.



Рисунок 6 — Панель *Термічні навантаження*

Функціональність команд на панелі Теплове навантаження описана нижче (Рисунок 6).

Температура. Призначає температуру об'єкту, вибраному для активної вправи з типом аналізу Тепловий або Статичний.

Конвекція. Застосовує конвекцію до поверхонь, вибраних у вправі з типом Тепловий аналіз.

Тепловий потік. Застосовує тепловий потік до вибраних поверхонь активної вправи з типом Тепловий аналіз.

Теплове випромінювання. Застосовує тепловіддачу до вибраних поверхонь активної вправи з типом аналізу Тепловий.

Випромінювання. Визначення випромінювання вибраних поверхонь активної вправи з типом аналізу Теплове.



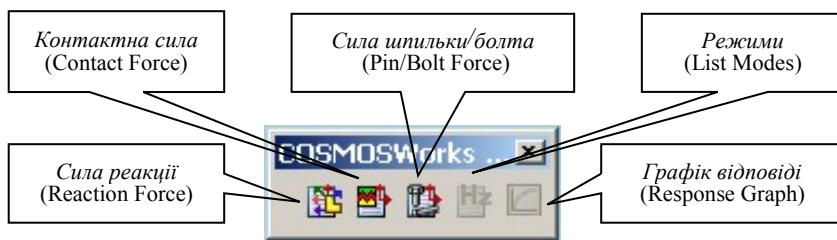


Рисунок 7 — Панель Показати інструменти результатів

Функціональність команд на панелі Show Results Tools наступна (Рисунок 7)

Сила реакції. Відображає інтегральне значення сил на геометричних елементах частини, групи частин і всієї групи.

Контактні сили. Виведення числових характеристик контактних сил на контактних поверхнях між деталями в збірці.

Також виводяться значення сил, що виникають внаслідок тертя.

Зусилля на штифт/болт. Виведення осьової складової, зсувної складової і крутного моменту сил, що виникають в болтових з'єднаннях. Компонента, зумовлена попереднім натягом, також включена до відображуваних значень.

Режим. Відображення власних частот для резонансних розрахунків.

Графік відгуку Генерация кривих відгуку для нелінійних задач.

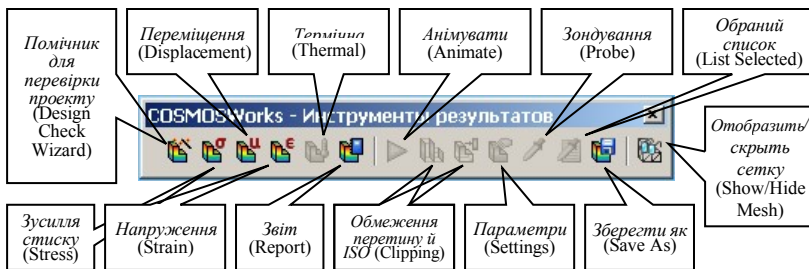


Рисунок 8 — Панель Інструменти результатів

Функціональність команд на панелі інструментів результатів описано нижче (Рисунок 8).

Асистент верифікації проекту Активний Активує Асистент верифікації проекту для статичних вправ. Порівнює результати розрахунків напружень відповідно до обраного критерію міцності.

Стискаючі зусилля. Візуалізація епюр напружень: компоненти в глобальній або локальній системі координат, еквівалентні напруження за Мізесом, оцінка похибок розрахунку напружень.

Переміщення. Візуалізація діаграм переміщень у глобальній або локальній системі координат, сил реакцій та їх компонентів.

Напруження Візуалізація епюр напружень для глобальної або локальної систем координат.

Візуалізація діаграм деформацій, еквівалентних деформацій і густини енергії деформацій для глобальних і локальних систем координат.

Температура. Візуалізація температурних діаграм, градієнта температури, теплового потоку і градієнта для сферичних або локальних систем координат.

Звіти Створює звіти з результатами поточної активної вправи.

Анімація Анімує модель під час виконання вправи.

Обмеження перерізу або ISO Вмикає вікно Розрізу. Використовується для керування перерізами активного вигляду або для створення ізоповерхонь.

Параметри Встановити параметри для відображення активної діаграми з результатами. До них відносяться спосіб відображення сіток і границь, деталей у збірці і масштаб подання деформації.

Зондування Виводить числове значення результату візуалізації для точки, найближчої до вказаної точки на поверхні або перерізі моделі.

Список вибору. Вузли, що належать (одному або декільком) вказаним об'єктам моделі з числовими значеннями для відображення результатів. Інструмент для створення діаграм площ у форматі, знайомому для опорів матеріалів.

Зберегти як - зберігає активну модель у файл.

Показати/приховати мережу. При візуалізації будь-якого результату ця функція показує "звичайний" вигляд моделі SolidWorks.

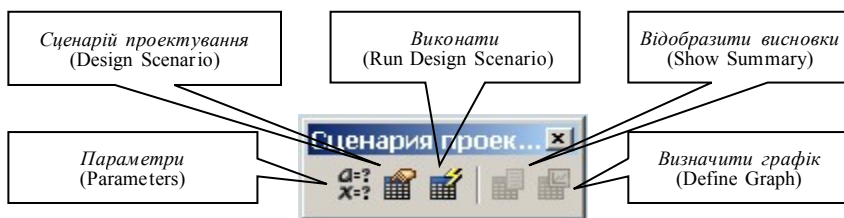


Рисунок 9 — Панель *Сценарій проєктування*

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Сценарій проєктування* (рис. 9).

*Параметри.* Формування таблиці параметрів, що містить характеристики, а також їхні комбінації, які будуть змінюватися в ході виконання *Сценарію проектування* (Design Scenario).

*Сценарій проектування.* Призначення однієї або декількох сукупностей параметрів.

*Виконати.* Виконання *Сценарію проектування*.

*Відобразити висновки.* Виведення результатів виконання *Сценарію проектування*.

*Визначити графік.* Формування графіків, що відображають залежності результатів від параметрів, включених у *Сценарій проектування*.

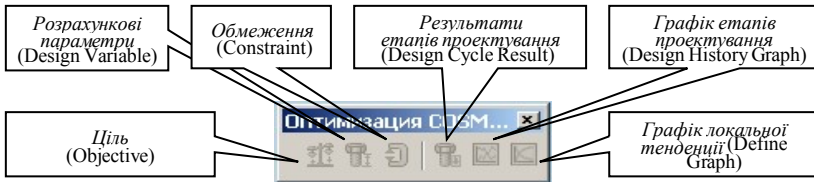


Рисунок 10 — Панель *Оптимізація*

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Оптимізація* (рис. 10).

*Ціль.* Призначення цільової функції для активної *Вправи* з типом аналізу *Оптимізація*.

*Розрахункові параметри.* Завдання змінних проектування для *Вправи* з типом аналізу *Оптимізація*.

*Обмеження.* Завдання обмежень для *Вправи* з типом аналізу *Оптимізація*.

*Результати етапів проектування.* Відображення моделі на заданому кроці ітерації після успішного оптимізаційного аналізу.

*Графік етапів проектування.* Відображення графіків залежності змінних проектування, цільової функції й обмежень від номера ітерації після успішного оптимізаційного аналізу.

*Графік локальної тенденції.* Відображення графіків залежності змінних проектування від цільової функції й обмежень.

#### 4.3.4. Функціональні можливості

COSMOSWorks запозичує математику пре- і постпроцесора, алгоритми генерації матриць жорсткості та лінійні розв'язувачі з універсальної програми скінченних елементів COSMOSM. Можливості проектування спочатку були обмежені тетраедричними скінченними елементами окремих деталей або збірок з монолітно з'єднаними деталями. Подальший розвиток програми відбувся у співпраці з SolidWorks і полягав у додаванні функціональності, необхідної для типових проектних ситуацій.

##### 4.3.4.1. Базові можливості аналізу

COSMOSWorks надає можливість виконувати різноманітні види моделювання, включаючи:

— Статичний аналіз у пружній постановці, який враховує окремі деталі у просторовій або оболонковій моделі, а також взаємодію деталей у тривимірній постановці зі зборками.

— Розрахунок власних частот та відповідних форм для деталей у твердотілому або оболонковому поданні, а також для збірок з нерухомими деталями.

— Розрахунок критичних навантажень та відповідних їм форм для деталей у твердотілому або оболонковому поданні, а також для збірок з нерухомими деталями.

— Тепловий розрахунок, який враховує явища теплопровідності, конвекції, та випромінювання, за відсутності руху середовища.

— Термопружний аналіз, що базується на результаті теплового розрахунку.

— Параметрична оптимізація за критерієм мінімізації/максимізації маси, об'єму, власних частот та критичної сили.

— Імітація деформації конструкції з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності, а також змінення навантажень і температури з плином часу.

— Моделювання ефекту падіння конструкції на жорстку поверхню.

— Розрахунок на втомлюваність з урахуванням кривих утоми, функції навантаження, а також лінійної гіпотези підсумовування ушкоджень.

Усі ці види аналізу можуть бути пов'язані з однією й тією ж моделлю виробу, створеною в SolidWorks.

#### 4.3.4.2. Послідовність розрахунку

COSMOSWorks вимагає дотримання алгоритму методу скінчених елементів, що включає у себе певний порядок кроків у підготовці моделі та візуальному аналізі результатів розрахунків у пружній постановці. Розглянемо ці етапи детальніше:

— Створення аналізу конкретного типу та визначення його налаштувань.

— Заповнення, за необхідності, таблиці параметрів, де визначаються змінні величини, які можуть змінюватися під час розрахунку.

— Підготовка вихідних даних всередині визначеного аналізу, таких як призначення матеріалу для деталей, задання кінематичних і статичних граничних умов, а також побудова сітки.

— Зв'язування, якщо потрібно, параметрів із таблиці з параметрами відповідних аналізів.

- Виконання розрахунку.
- Обробка результатів, включаючи створення необхідних діаграм, їх аналіз, та експорт результатів.

Процедура оптимізації ґрунтується на результатах розрахунків у лінійній постановці, такі як статичний аналіз, розрахунок власних частот та стійкості.

### 4.3. Властивості матеріалів

Лінійний розрахунок може бути здійснений з використанням ізотропних та ортотропних (ортогонально та циліндрично) матеріалів. Для деталей із пластичних матеріалів із ізотропним зміцненням може бути виконаний розрахунок на падіння. Важливо відзначити, що у межах однієї деталі може бути призначено лише один матеріал, тоді як для кожної деталі в збірці може бути визначено будь-який матеріал. У випадку оболонкової моделі, побудованої на основі поверхонь або граней, матеріал (так само, як і товщина) призначається незалежно для кожної грани оболонки. Якщо сітка оболонкових елементів будується на основі середніх поверхонь, то матеріал визначається для деталі в цілому.

#### 4.3.4.4. Граничні умови

COSMOSWorks підтримує різноманітні типи граничних умов, причому для розрахунків у пружній постановці ці умови залишаються незмінними в часі. У випадку нестационарної теплової задачі можуть бути використані теплові датчики, що впливають на перемикання джерел тепла. Програма також надає імітатори з'єднань, пружні основи, зв'язку між недотичними деталями збірки та граничні умови, що діють на відстані.

#### 4.3.4.5. Генерація сітки

Сітка будується автоматично без можливості подальшого коригування, але існують інструменти керування щільністю сітки. Адаптивна сітка дозволяє змінювати порядок скінчених елементів у зонах значного градієнта густини енергії деформації. Побудова сітки для контактних задач автоматично відбувається після призначення користувачем типу контактних граничних умов.

#### 4.3.4.6. Контактна задача

Розрахункова модель збірки у статичному аналізі може включати контактні граничні умови різних типів, такі як спільне переміщення, незалежне переміщення, проковзування та виходження з контакту, вхід та вихід в контакт для малих зазорів, імітацію гарячої посадки для циліндричних тіл. У межах одного аналізу для збірки можуть співіснувати контактні граничні умови різних типів.

#### 4.3.4.7. Додаткові можливості

COSMOSWorks пропонує різноманітні способи відображення діаграм результатів, використовуючи колір, ізолінії, перерізи, деформований вигляд, накладення на початкову модель, розчленований стан для вузлів, а також отримання результатів у числовому вигляді в конкретній точці і так далі. COSMOSWorks може імпортувати навантаження руху з COSMOSMotion та перетворювати їх в інерційні навантаження для окремих деталей. Програма також здатна імпортувати інформацію про розподіл температури та тиску з COSMOSFloWorks. Крім того, COSMOSWorks може експортувати інформацію про сітку та, у деяких випадках, граничні умови в універсальні пакети скінчено-елементного аналізу.



### **Питання для самостійного контролю.**

1. Назвіть кілька відомих систем інтегрованого проектування виробів.
2. Що таке CALS-технологія і які програмні пакети пов'язані з CALS-технологією?
3. Назвіть відомі програмні пакети, призначені для інженерних і дослідницьких розрахунків, які підтримують розробку технічних продуктів.
4. Які типи задач вирішують CAE-програми?
5. Назвіть деякі поширені алгоритми розв'язання задач за допомогою CAE-пакетів.
6. Що таке метод скінченних елементів? Що таке поняття скінченних елементів?
7. Загальні алгоритми методу скінченних елементів та різні аспекти його застосування.
8. Особливості застосування методів оптимізації в пакетах інженерного аналізу.
9. Алгоритми поєднання програм умовної оптимізації та розрахунків у прикладних пакетах на прикладі COSMOSWorks.
10. Можливості пакету COSMOS для розв'язання інженерних задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.
2. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / Под ред. А.И. Половинкина.- М.: Радио и связь, 1981.-344 с.
3. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. — М.: Моск. рабочий, 1973. — 296 с. 4. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. — М.: Сов. радио, 1979. — 176 с.
5. Алямовский А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 432 с.
6. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения).- М.: Машиностроение, 1998.-476 с.
7. Буш Г.О. Основы эвристики для изобретателей. – Рига: Изд-во общ-ва "Знание" Латв. ССР, 1977. – 159 с.
8. Буш Г.Я. Аналогия и техническое творчество. – Рига: Авотс, 1981. – 139 с.
9. Буш Г.Я. Методологические основы научного управления изобретательством. – Рига: Лиесма, 1974. – 168 с.
10. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ.— М.: Мир, 1984. 11. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. — 509 с.

12. Глазунов В.Н. Параметрический метод разрешения противоречий в технике (методы анализа проблем и поиска решений в технике) — М.: Речной транспорт, 1990. — 150 с.
13. Григолюк Э.И., Шалашилин В.И. Проблемы нелинейного деформирования. — М.: Наука, 1988.
14. Комплексный метод поиска новых технических решений / М. И. Вайнерман, Б. И. Голдовский и др. Горький: 1979, 1980.
15. Кузнецов И.В. Избранные труды по методологии физики.  
- М., 1975
16. Лук А.Н. Психология творчества. – М.: Наука, 1978. – 128 с.
17. Методика проектирования для промышленного дизайна и всех его составляющих. М. Ключев. WEB: [www.rosdesign.com, ndn.su/design/metodika\\_1.htm](http://www.rosdesign.com, ndn.su/design/metodika_1.htm).
18. Методы поиска новых технических решений / Под ред. А.И. Половинкина. — Йошкар-Ола: Марийск. кн. изд-во, 1976. — 192 с.
19. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред: Пер. с англ. —М.: Мир, 1976.
20. Одрин В.М., Картавов С.С. Морфологический анализ систем. – Киев: Наук. думка, 1977. – 148 с.
21. Основы функционально-стоимостного анализа / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
22. Повилейко Р.П. Инженерное творчество. – М.: Знание, серия "Техника", 4, 1977. – 64 с.
23. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгдел К. Оптимизация в технике. Пер. с англ. — М.: Мир, 1986.
24. Рузавин Г.И. Методология научного исследования. — М., 1999.

25. Рузавин Г.И. Методы научного исследования. — М., 1974.
26. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 392 с.
27. Селюцкий А.Б., Слугин Г.И. Вдохновение по заказу. — Петрозаводск: Карелия, 1977. — 190 с.
28. Ханзен Ф. Основы общей методики конструирования. — Л.: Машиностроение, 1969. — 166 с.
29. Чус А.В., Данченко В.Н. Основы технического творчества. — Донецк: Вища школа, 1983. — 184 с.
30. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса. — М.: Прогресс, 1974. — 588 с.
31. COSMOSDesignSTAR 4.5 Basic User's Guide. Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.
32. COSMOSDesignSTAR 4.5 Nonlinear User's Guide. Structural Research and Analysis Corporation, USA, 2004.