

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**А.І. ГРАБЧЕНКО, В.О. ФЕДОРОВИЧ, Я.М. ГАРАЩЕНКО**

## **МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**Навчальний посібник**

**Харків – 2009**

УДК 001.891:621  
ББК 72:34.5  
М-54



Публікацію навчального посібника здійснено за фінансової підтримки Європейської Комісії в рамках виконання проекту за програмою ТЕМПУС "Навчання українських інженерів комп'ютерному промислому проектуванню (дизайну)"

Дане видання відображає лише думку авторів; Європейська Комісія не несе відповідальності за інформацію представлену в посібнику.

Edition of the manual is provided within the financial support by the EU Commission in the frameworks of Tempus Project "Computer Aided Industrial Design Training for Ukrainian Engineers".

This publication reflects the views only of the author and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information therein.

*Рецензенти:*

*Верезуб М.В. - д-р техн. наук, проф. НТУ "Харківський політехнічний інститут",  
Залога В.О. – докт. техн. наук, зав. кафедри Сумського державного технічного університету.*

*Затверджено редакційно-видавничою радою університету, протокол № 2 від 19.06.2009 р.*

М-54

Грабченко А.І., Федорович В.О., Гаращенко Я.М. Методи наукових досліджень: Навч. посібник. – Х.: НТУ "ХПІ", 2009. – 142 с.

ISBN 978-966-8944-65-9

Навчальний посібник підготовлено згідно з навчальним планом магістерського курсу "Автоматизований промисловий дизайн" в рамках спеціальності 8.05050201 "Технологія машинобудування", розробленим відповідно до спільного європейського проекту ТЕМПУС у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут". В навчальному посібнику представлено основні наукові підходи, методи пошуку нових технічних рішень і можливості використання інтегрованих систем проектування, що використовуються у інженерній і науковій діяльності. Посібник призначений для магістрантів технічних вузів, які вивчають курс "Методи наукових досліджень", а також може бути корисним студентам інженерних спеціальностей і аспірантам.

ISBN 978-966-8944-65-9

© НТУ «ХПІ», 2009.

© Грабченко А.І., Федорович В.О., Гаращенко Я.М.



В реалізації даного проекту задіяні наступні ВНЗ:

The following higher education institutions are involved in project realization:

*Житомирський державний технологічний університет*

*Zhytomyr State Technological University*



*Національний технічний університет  
"Харківський Політехнічний Інститут"*

*National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"*



*Запорізький національний технічний університет*

*Zaporizhzhya National Technical University*



*Національний авіаційний Університет*

*National Aviation University*



*Технічний університет м. Дрезден*

*Technical University of Dresden*



*Технічний університет м. Ліберець*

*Technical University of Liberec*



**ABSTRACT**

The textbook is prepared according to the curriculum master's course "Automated industrial design" on a speciality 8.05050201 "Technology of mechanical engineering", developed within the limits of Joint European Project Tempus "Computer Aided Industrial Design Training for Ukrainian Engineers" on department "Integrated technologies of mechanical engineering" M.F. Semka's name of national technical university "Kharkiv polytechnical institute". In the textbook the basic scientific approaches, methods of search of new technical decisions and capability of the integrated systems of designing which are used at engineering and scientific activity are presented. The textbook is intended for master of technical universities which study a course "Methods of scientific researches", and also can be to useful students of all engineering specialities and post-graduate students.

The discipline "methods of scientific researches" is called to play a key role realization of creative potential of the engineering and scientific staff, and also in reorganization and increase of efficiency of their work. First, providing growth of a share of students which be a demon for work and independently, as a result getting an active position and the raised creative potential - very actual qualities for the young engineer or scientist. Secondly, multiple increases in a share of master's projects which contain creative engineering decisions. Thirdly, raising volume of intellectual production on faculty in the form of patents for the inventions made by teachers and students, and also in the form of the offers developed and realized in practice concerning new engineering and design decisions.

Authors express sincere gratitude to Professor V.L. Dobroskok for remarks to the manuscript.

---

**TABLE OF CONTENTS**

Foreword .....	9
<b>Chapter 1. SCIENTIFIC APPROACHES TO STUDYING AND PERFECTION OF TECHNICAL PRODUCTS .....</b>	<b>11</b>
1.1. Kinds of scientific and technical research and their essence .....	11
1.2. The general concept about methods of scientific researches and their classification .....	14
1.3. Methods of empirical and theoretical researches .....	16
1.3.1. Methods of empirical research .....	16
1.3.2. Methods of theoretical research .....	18
1.3.3. General methods of scientific research .....	23
1.4. Methodological approaches in scientific research .....	30
1.4.1. System-structural approach .....	30
1.4.2. Synergetic approach .....	34
Questions for the independent control .....	38
<b>Chapter 2. THE ANALYSIS OF TASKS AND SYNTHESIS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL DECISIONS AT DESIGNING PRODUCTS .....</b>	<b>39</b>
2.1. The basic stages of solution process of the design tasks and their methodological maintenance .....	39
2.2. Statement of task .....	44
2.3. Analysis of a technical task .....	47
2.4. The formulation of a task conditions, search ideas of the decision .....	50
2.5. Synthesis of the new technical decision .....	57
Questions for the independent control .....	59
<b>Chapter 3. SEARCH METHODS OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL DECISIONS .....</b>	<b>60</b>
3.1. General concepts about methods of search .....	60
3.2. Associative methods of search .....	62
3.3. Methods of test questions .....	65
3.4. Brainstorm. Syntectics .....	68
3.5. Morphological analysis .....	72
3.6. Generalized heuristic method.....	75

---

3.7. Other methods of search of technical decisions .....	80
Questions for the independent control .....	85
<b>Chapter 4. OPPORTUNITIES INTEGRATED SYSTEMS OF DESIGNING FOR DEVELOPMENT OF PRODUCTS .....</b>	<b>86</b>
4.1. General data about the integrated systems of products designing .....	86
4.2. Methods of the decision of engineering problems at a design stage of technical products and systems .....	90
4.2.1. Bases of a finite elements method .....	90
4.2.2. Methods of optimization in the engineering analysis .....	98
4.3. Opportunities of performance of engineering problems by use of software COSMOS .....	108
4.3.1. Purpose of the software .....	108
4.3.2. Theoretical base .....	109
4.3.3. The interface .....	111
4.3.4. Functionalities .....	118
Questions for the independent control .....	122
The literature list .....	123
Appendix 1. A universal method designing of technical products ....	125
Appendix 2. The computer integrated systems of designing.....	133

**ЗМІСТ**

ПЕРЕДМОВА .....	9
Розділ 1. НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИВЧЕННЯ І УДОСКОНАЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ .....	11
1.1. Види науково-технічного дослідження і їхня сутність... 11	
1.2. Загальне поняття про методи наукового дослідження і їхня класифікація .....	14
1.3. Методи емпіричного і теоретичного дослідження..... 16	
1.3.1. Методи емпіричного дослідження..... 16	
1.3.2. Методи теоретичного дослідження .....	18
1.3.3. Загальнонаукові методи дослідження .....	23
1.4. Методологічні підходи в науковому дослідженні .....	30
1.4.1. Системно-структурний підхід..... 30	
1.4.2. Синергетичний підхід .....	34
Питання для самостійного контролю .....	38
Розділ 2. АНАЛІЗ ЗАДАЧ І СИНТЕЗ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВИРОБІВ .....	39
2.1. Основні етапи процесу рішення проектних задач і їхнє методологічне забезпечення .....	39
2.2. Постановка задачі..... 44	
2.3. Аналіз технічної задачі .....	47
2.4. Формулювання умов задач, пошук ідеї рішення..... 50	
2.5. Синтез нового технічного рішення..... 57	
Питання для самостійного контролю .....	59
Розділ 3. МЕТОДИ ПОШУКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ..... 60	
3.1. Загальні поняття про методи пошуку..... 60	
3.2. Асоціативні методи пошуку..... 62	
3.3. Методи контрольних питань .....	65
3.4. Мозковий штурм. Синектика .....	68
3.5. Морфологічний аналіз .....	72
3.6. Узагальнений евристичний метод .....	75
3.7. Інші методи пошуку технічних рішень .....	80
Питання для самостійного контролю .....	85

---

Розділ 4. МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ ...	86
4.1. Загальні відомості щодо інтегрованих систем проектування виробів .....	86
4.2. Методи рішення інженерних задач на етапі проектування технічних виробів і систем .....	90
4.2.1. Основи методу скінчених елементів .....	90
4.2.2. Методи оптимізації в інженерному аналізі.....	98
4.3. Можливості виконання інженерних задач із використанням пакета COSMOS .....	108
4.3.1. Призначення пакета .....	108
4.3.2. Теоретична база .....	109
4.3.3. Інтерфейс.....	111
4.3.4. Функціональні можливості.....	128
Питання для самостійного контролю .....	122
Список літератури.....	123
Додаток 1. УНІВЕРСАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ДИЗАЙНУ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ.....	125
Додаток 2. КОМП'ЮТЕРНІ ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ.....	133



## ПЕРЕДМОВА

Одним із головних недоліків у підготовці більшості випускників інженерних спеціальностей є невміння самостійно ставити нові задачі, невміння вирішувати задачі пошуку нових конструкторсько-технологічних рішень, що забезпечують у підсумку підвищення якості технічного виробу, досягнення конкурентного рівня, всебічну інтенсифікацію й економію ресурсів. Навчальний процес в основному побудований на вирішенні таких теоретичних і практичних задач, для яких уже є готова її постановка, дається спосіб її вирішення, є приклади вирішення по цьому способу, а викладачам (як правило і студентам) відома відповідь. При цьому вирішення задачі часто перетворюється в рутинну роботу, що не вимагає творчих ідей. На додаток до придбання навичок вирішення таких завдань майбутній фахівець зобов'язаний оволодіти знаннями й навичками вирішення творчих технічних задач у яких немає готової постановки, невідомий спосіб вирішення, немає близьких прикладів вирішення аналогічних задач, а викладачеві - невідома відповідь, що за звичай має декілька варіантів.

Процес формування інженерних кадрів повинен бути підпорядкований розвитку в них навичок самостійної технічної творчості, системного аналізу техніко-економічних проблем, уміння знаходити ефективні рішення.

Дисципліна "Методи наукових досліджень" покликана зіграти ключову роль у реалізації творчого потенціалу інженерних і наукових кадрів, а також у перебудові і підвищенні ефективності їхньої роботи. По-перше, забезпечуючи зростання частки студентів, що працюють із захопленням і самостійно, у підсумку здобуваючи активну позицію і підвищений творчий потенціал - дуже актуальні якості для молодого фахівця. По-друге, за рахунок багаторазового збільшення долі курсових і дипломних проектів, що містять творчі інженерні рішення. По-третє, підвищуючи обсяг інтелектуальної продукції на кафедрі у вигляді авторських посвідчень свідоцтв і патентів на винаходи, зроблені викладачами і студентами, а також у вигляді розроблених і реалізованих на практиці пропозицій щодо нових конструкторсько-технологічних рішень.

Навчальний посібник підготовлено згідно з навчальним планом магістерського курсу "Автоматизований промисловий дизайн" за спеціальністю 8.05050201 "Технологія машинобудування», розробленим відповідно до спільного європейського проекту ТЕМПУС у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут". В навчальному посібнику представлено основні наукові підходи, методи пошуку нових технічних рішень і можливості інтегрованих систем проектування, що використовуються в інженерній і науковій діяльності.

Автори висловлюють щирю вдячність проф. Добросококу В.Л. за слухні зауваження до рукопису.

## Розділ 1 НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ВИВЧЕННЯ І УДОСКОНАЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ

У цьому розділі узагальнено уявлення щодо методології, видів і методів наукового дослідження, які є придатними для вивчення й удосконалювання технічного виробу на всіх етапах життєвого циклу, у тому числі і на етапі його проектування. Для кращого розуміння спеціальних методів, що використовуються при проектуванні виробу (розглянутих у наступних розділах) приводиться загальна класифікація методів дослідження, починаючи з їхніх видів і закінчуючи методологічними підходами у науково-технічному пізнанні.

### 1.1. Види науково-технічного дослідження і їхня сутність

Для розвитку наукового пізнання характерно не тільки розширення кола розв'язуваних теоретичних і практичних завдань, але й посилення уваги до способів і методів науково-технічної діяльності. Одержання необхідного результату безпосередньо залежить від вихідної теоретичної позиції, від принципового підходу до постановки проблеми й визначення шляху дослідницького пошуку.

У науково-технічному дослідженні розрізняють дві основні стадії пізнання: теоретичну й емпіричну.

Для теоретичного характерно широке використання абстрагування, ідеалізації, утворення понять, побудова гіпотез, моделей, теорій.

Емпіричне дослідження засноване на спостереженнях, експериментах й опирається на дані досвіду.

Іноді теорію протиставляють емпірії. Але таке протиставлення не є правомірним, тому що теоретичні передбачення мають такий же імовірнісний, а не достовірний характер, як і передбачення, що опираються на емпіричні узагальнення. При цьому, кінцевою метою пізнання є утворення не окремих понять, гіпотез, або навіть не відкриття відособлених законів, а побудова єдиної, концептуальної системи, за допомогою якої досягається більш адекватне й цілісне відображення певної області дійсності.

Розвиток будь-якої науки багато в чому залежить не тільки від застосування досконалих методів дослідження, але й від різноманіття видів дослідження.

Але на сьогодні не існує чітко встановленої класифікації видів і методів наукового дослідження. Тому дамо загальне уявлення щодо їхньої класифікації.

Спочатку розглянемо види наукових досліджень.

За масштабом розв'язуваних проблем і цілей дослідження розрізняють фундаментальні й прикладні дослідження.

Під фундаментальними дослідженнями розуміються такі, що ставлять за мету розкрити й описати нові, невідомі явища й процеси в природі і суспільстві, дослідити їхній механізм і закони, що керують ними, розкрити глибинні зв'язки між ними. Фундаментальні дослідження виявляють закони й закономірності процесів, явищ, вибудовують загальнотеоретичні концепції, методологію вони створюють теоретичну базу для прикладних досліджень.

Деякі автори виділяють два види фундаментальних досліджень: пошукові й тематичні. Пошукові або вільні - це ті фундаментальні дослідження великої, але ще мало дослідженої проблеми. До тематичних фундаментальних (або цільових) відносяться такі дослідження, у яких метою є рішення конкретної, більш вузької проблеми.

Прикладні дослідження - це такі дослідження, призначення яких - реалізувати результати фундаментальних досліджень у практичній діяльності. Прикладні дослідження вирішують вузькоспеціальні теоретичні й практичні завдання. Предмет прикладних досліджень окреслений вужчими рамками і спрямований на практичний результат.

Прикладні дослідницькі роботи також підрозділяються на два види: телонічні (від гр. *telos* - кінець, ціль), тобто, цільові й тематичні, або суб'єктивні. Як приклад телонічного дослідження, можна привести дослідження, пов'язані із запуском космічних апаратів, що вимагають використання фундаментальних досягнень багатьох наук: астрономії, математики, електроніки, механіки, хімії, біології, психології й т. п.

Тематичні прикладні дослідження - це ті, які присвячені більш вузькій, конкретній темі, наприклад, науково-дослідна

робота кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "ХП", це "розробка методів прогнозування вихідних характеристик робочих процесів технологій пошарового виготовлення - Rapid Prototyping".

Розподіл наук і наукових методів досліджень на фундаментальні і прикладні носить умовний характер.

У методології наукового дослідження виділяють і інші види дослідження. Так, за рівнем наукового пізнання розрізняють: *емпіричне* (від гр. *empeiria* - досвід); *експериментальне* (або *емпірично- експериментальне*); *теоретичне*; *комплексне* (дослідження, що включає всі види досліджень).

Розглянемо сутність емпіричного й експериментального дослідження, але відзначимо, що не всі дослідники усвідомлюють різницю між досвідом й експериментом, особливо різницю між досвідом як філософським поняттям і досвідом - близьким до експерименту.

У вузькому розумінні - досвід близький, але не тотожний експерименту.

Досвід у його вузькому розумінні - це активне, можливо творче освоєння й реалізація в практиці вже розроблених законів, принципів, теорій, способів, форм і т. д.

Експеримент - це загальнонауковий метод дослідження, що полягає в активній теоретико-практичній діяльності експериментатора, що створить сприятливу ситуацію для планомірного вивчення об'єкта в процесі запланованого, цілеспрямованого, спеціально організованого його розвитку й функціонування. Експеримент здійснює верифікацію (перевірку) тобто точне, експериментально підтверджене визначення ефективності пропонованих нових способів, методів, умов розвитку об'єкта та теорій, концепцій, пропонованих самим автором дослідження й здійснюваних шляхом зіставлення їх зі спостережуваними об'єктами, чуттєвими даними, тобто даними досвіду.

Для осмислення сутності теоретичного дослідження необхідно зрозуміти, що наука не є простою сумою достовірних наукових фактів, простим описом спостережень, досвіду, явищ, спостережуваних об'єктів.

Факти в будь-якій науці необхідні, але для того щоб факти

(явища) тобто результати спостережень досліджуваної дійсності (показання дослідів, приладів, дані експериментів, протоколи й т. і.) увійшли в наукову теорію як докази її положень, необхідно їхнє теоретичне осмислення, теоретична обробка. Для цього необхідно піддати їх: відбору, класифікації, аналізу, порівнянню, узагальненню й поясненню. Тільки так можна встановити причинно-наслідкові зв'язки явищ, тобто усвідомити закономірності, об'єктивні, стійкі залежності між всіма компонентами досліджуваного явища.

Для теоретичного осмислення досліджуваного явища (об'єкту) вводять абстрактні поняття, висувають гіпотези, відкривають закони й будують наукові теорії, що розкривають внутрішні механізми протікання явищ.

Теорії, які описують і систематизують накопичений емпіричний матеріал, а також установлюють логічні зв'язки між окремими його елементами, називають феноменологічними або дескриптивними, тобто описовими. Такі теорії переважають на ранній стадії розвитку будь-якої науки. На відміну від них, не феноменологічні теорії пояснюють спостережувані явища, і тому їх називають пояснювальними, а також інтерпретативними теоріями.

Виділяють ще пролонговане дослідження (від лат. *pro* - уперед, *longis* - довгий, далекий). Це дослідження, що припускає тривале й систематичне вивчення об'єкта, особистості, явища й на основі цього прогнозування подальшого розвитку досліджуваного предмету дослідження.

Одержавши уявлення щодо видів науково-технічного дослідження, тепер можна перейти до визначення поняття "метод дослідження".

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

Існує ряд визначень поняття "метод дослідження". Але спочатку визначимо поняття "метод".

У філософських словниках "метод" (від греч. *methodos* - шлях, спосіб пізнання, дослідження, простежування) визначається як спосіб досягнення певної мети, сукупність прийомів або операцій практичного або теоретичного освоєння дійсності. Метод є шлях пізнання, що дослідник прокладає до свого предмета,

керуючись певною гіпотезою.

Визначень поняття "метод дослідження" існує декілька. І вони не суперечать один одному.

По визначенню Г.І. Рузавіна [24, 25], метод пізнання, або метод дослідження - це деяка специфічна процедура, що складається з певних дій або операцій, за допомогою яких здобувається й обґрунтовується нове знання в науці.

Деякі вчені під методами дослідження розуміють способи рішення науково-технічних завдань; інструмент для проникнення в глибину дослідницьких об'єктів.

З методологічної точки зору, друге визначення не зовсім коректне. Тому що, даючи таке визначення поняття "метод дослідження", коли в якості родового вживається поняття "спосіб", тобто його синонім, це б прозвучало, що "метод" - це метод, що... При дефініції понять учені нерідко припускаються такої логічної помилки.

Методи дослідження класифікуються деякими методологами за різними ознаками: *за рівнем пізнання* - емпіричні й теоретичні; *за точністю припущень* - детерміністичні й стохастичні, або ймовірісно-статистичні; *за функціями, які вони здійснюють у пізнанні* - методи систематизації, пояснення й прогнозування; *від конкретної області дослідження* - фізичні, біологічні, соціальні, технічні й т.п.

З ширшого погляду методи дослідження поділяють на *загальнонаукові* (тобто вони можуть бути методами й емпіричного, і теоретичного дослідження) і *спеціальні*, що застосовуються в конкретній галузі науки. У будь-якому дослідженні звичайно ж суміщаються і загальнонаукові, і спеціальні методи дослідження.

Загальнонаукові методи дослідження поділяють на три великі групи: *методи емпіричного дослідження* (спостереження, порівняння, вимір, експеримент, моніторинг); *методи теоретичного дослідження* (сходження від абстрактного до конкретного, ідеалізація, уявний експеримент, формалізація, аксіоматичний метод або дедуктивно-аксіоматичний); *загальні методи*, використовувані як на емпіричному, так і на теоретичному рівні дослідження (абстрагування й конкретизація, аналіз, синтез, індукція, дедукція, абдукція, моделювання, аналогія, історичний і логічний методи, метод графів).

Аналіз, синтез, моделювання й ін. методи раніше вважалися методами тільки теоретичного дослідження. Але в останні роки ці методи обслуговують й емпіричні, і теоретичні дослідження, але з різним ступенем глибини.

Крім вищезгаданих загальнонаукових методів дослідження в методології деяких наук виділяються й *спеціальні методи*. До них належать: морфологічний аналіз, синектика, метод Монте-Карло, метод найменших квадратів, тестування, моніторинг і т.д.

Не варто до методів дослідження відносити *вивчення* (літератури, досвіду, документації й т.д.) – це методологічна помилка. Вивчення може бути лише етапом дослідження, пізнання. Цей процес супроводжує всі дослідження. З вивчення літератури, об'єкта може початися дослідження, до нього можна повертатися на різних етапах пізнання для більш глибокого осмислення проблеми, тобто воно може бути вихідним або супроводжувати весь процес дослідження. Більше того, вивчення, у свою чергу, припускає застосування як спостереження, аналіз, порівняння й т. п.

Характерним є використання в технічних дослідженнях *кваліметричних* методів (або кількісних). У цей час активно розвивається цілий науковий напрямок, орієнтований на кількісний опис якості предметів, який має назву "*кваліметрія*". Це область наукового знання, що вивчає методологію й проблематику розробки системних кількісних оцінок якості предметів, явищ, процесів.

Розрізняють дві групи кількісних методів, щодо їх використання: перша - для обробки результатів спостережень і експериментів (особливо відомий серед них - статистичний метод); друга - для моделювання, діагностики, прогнозування, комп'ютеризації досліджуваного процесу.

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

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

Вище було вказано наступні методи емпіричного дослідження: спостереження, порівняння, експеримент, вимірювання, моніторинг.

*Спостереження*, по визначенню у філософських словниках, - це навмисне й цілеспрямоване сприйняття зовнішнього світу з



метою вивчення і відшукання смислу в явищах.

Спостереження вважається найбільш елементарним методом, що виступає, як правило, у якості одного зі складових у комплексі інших емпіричних методів.

Можливості метода спостереження обмежені. Він дозволяє виявити лише зовнішні ознаки, зовнішні прояви фактів. Внутрішні процеси залишаються для спостереження недоступними.

*Порівняння.* До найпоширеніших методів пізнання, наукового дослідження належить і порівняння. Не випадково існує відома сентенція "усе пізнається в порівнянні". Порівняння дозволяє визначити подібність і відмінність предметів і явищ, теорій, точок зору, виявити те спільне, що властиво двом або декільком об'єктам, а виявлення спільного є шаблоном на шляху до пізнання закономірностей і законів.

До порівняння, як методу пізнання, висуваються певні вимоги: порівнюватися повинні лише такі об'єкти і явища, між якими може існувати певна об'єктивна спільність; порівняння повинне здійснюватися за найбільш важливими, істотними ознаками.

Для порівняння можна використовувати наступний алгоритм:

- розглянути кожен досліджуваний об'єкт або явище окремо;
- виокремити ознаки, за якими можна їх порівняти;
- порівняти об'єкти або явища по всіх ознаках відносно одного об'єкта або явища;
- визначити спільне;
- визначити відмінності.

*Експеримент* (від лат. *experimentum* - проба, досвід) визначається в деяких словниках як планомірно проведене спостереження; планомірна ізоляція, комбінація і варіювання умов з метою вивчення залежних від них явищ. Тим самим людина створює можливість спостережень, на основі яких складаються його знання про закономірності в спостережуваному явищі.

Існує й таке визначення: експеримент - це випробування, перевірка досліджуваних явищ у контрольованих і керованих умовах.

Науково поставлений експеримент може бути здійснений лише при наявності теорії або теоретичної основи, що обумовлює завдання експерименту, дає узагальнення й пояснення його

результатів.

Організація експерименту має звичайно ряд стадій:

- висунення гіпотези;
- постановка конкретного завдання й вибір об'єкту дослідження;
- підготовка матеріальної бази для виконання експерименту;
- розробка й підготовка необхідного матеріалу;
- вибір оптимального шляху експерименту;
- спостереження явищ під чіс експерименту, їхня фіксація й опис;
- аналіз й узагальнення отриманих результатів.

У науково-технічному дослідженні експеримент і теорія тісно пов'язані. Усіляке розгортання експериментальних досліджень являє собою один з найбільш важливих шляхів розвитку сучасної науки.

Є різні види експериментів:

За місцем проведення:

- *природний* (проводиться в природних, реальних умовах);
- *лабораторний* (проводиться в спеціально створених дослідних умовах).

За часом (тривалістю) проведення довгостроковий і короткочасний;

За метою, за спрямованістю експерименту – для констатації і для формування.

*Експеримент для констатації*, називають іноді методом зрізів. Він орієнтований на виявлення, установлення фактичного стану досліджуваного об'єкта, на констатацію його вихідних параметрів, якостей.

*Експеримент для формування* називають ще творчим, перетворюючим. Це такий експеримент, що націлений, спрямований на перетворення, удосконалювання якості об'єкта, явища. Призначення цього виду експерименту в тому, щоб випробувати, апробувати й доказово перевірити вірогідність висунутих гіпотез, перевага і ефективність пропонованих і випробовуваних методів, прийомів, форм, умов і т.д.

### 1.3.2. Методи теоретичного дослідження

Пригадаємо, що до методів теоретичного дослідження

відносять метод сходження від абстрактного до конкретного, формалізацію, ідеалізацію, аксіоматичний метод.

Для теоретичного дослідження використовуються, звичайно ж, і інші методи, що є загальними і для емпіричного, і для теоретичного дослідження. У цьому підрозділі розглянемо методи теоретичного рівня дослідження.

Метод сходження від абстрактного до конкретного.

Для початку осмислимо основні його поняття: "абстрактне", "абстрагування", "абстракція" й "конкретне".

Термін "*абстрактне*" вживають для характеристики людського знання. Змістом абстрактного є окремі сторони, окремі властивості й зв'язки між речами. Тому під абстрактним розуміється одностороннє, неповне знання, що не розкриває сутності предмета в цілому. У зв'язку із цим абстрагування - це визначення, відділення та виокремлення однієї якої-небудь істотної сторони, властивості, ознаки явища або предмета й відволікання від всіх інших сторін, властивостей.

Результат абстрагування називається *абстракцією*. Абстракція вважається вищим щаблем у процесі розвитку людського знання.

Абстракція може виступати у формі чуттєво-наочного образу (наприклад, модель атома), ідеалізованого об'єкта (наприклад, "абсолютно чорне тіло"), судження ("цей предмет білий"), абстрактного поняття, категорії (найбільш широкого поняття тієї або іншої науки або філософії, наприклад, "матерія", "якість", "кількість", "міра" і т.д.), у формі закону (закон виключеного третього, закон тотожності) і т.п.

Термін "*конкретне*", як правило, використовується у двох основних значеннях: по-перше, під конкретним розуміється сама дійсність, різні об'єкти, узяті у всьому різноманітті їхніх властивостей, зв'язків і відносин; по-друге, термін "*конкретне*" уживається для позначення всебічного, деталізованого систематичного знання про об'єкт.

Отже, сходження від абстрактного до конкретного являє собою загальну форму руху наукового пізнання, закон відображення дійсності в мисленні. Відповідно до цього методу, процес пізнання як би розбивається на два відносно самостійних етапів:

- на першому етапі сходження від абстрактного до конкретного відбувається перехід від споглядання конкретного в дійсності до його абстрактних визначень (поняттям, судженням, умовиводам).

- другий етап (він же властиво і є сходження від абстрактного до конкретного) складається в русі думки від абстрактних визначень об'єкта, понять, тобто від абстрактного в пізнанні до конкретного в пізнанні, від цілого до частин. На цьому етапі як би відновлюється вихідна цілісність об'єкта, він відтворюється у всій багатогранності - але вже в мисленні.

Цей метод представляє собою процес пізнання, відповідно до якого мислення сходить спочатку від конкретного в дійсності до абстрактного в мисленні й від абстрактного в мисленні - до конкретного в мисленні.

*Метод формалізації.* Формалізація - це представлення найрізноманітніших об'єктів шляхом відображення й зображення їхнього змісту і структури в знаковій формі, за допомогою найрізноманітніших "штучних" мов, до числа яких належить мова математики, математичної логіки, хімії й інших наук.

Поняття "*формалізація*" знаходиться в тісному зв'язку з поняттям «абстрагування».

Явища нескінченно різноманітні, їхня систематизація стає можливою завдяки тому, що мислення виділяє якусь одну ознаку й абстрагується від інших. Одержуване в такий спосіб абстрактне знання стає емпіричним поняттям. Абстрагування характерно й для емпіричного мислення, з його допомогою виводяться емпіричні поняття.

Формалізація як метод дослідження має ряд достоїнств:

- забезпечує повноту огляду певної області проблем, узагальненість підходу до їхнього вирішення;

- базується на використанні спеціальної символіки, що забезпечує стислість і чіткість фіксації знання;

- пов'язана із приписуванням окремим символам або їхнім системам певних значень, що дозволяє уникнути багатозначності термінів, властивої звичайним мовам;

- дозволяє формувати знакові моделі об'єктів, а вивчення реальних речей і процесів замінити вивченням цих моделей.

Формалізація є невід'ємною частиною формальної логіки.

Прикладом реалізації формалізації в евклідовій геометрії може послужити той факт, що тут є невелике число незалежно внесених понять і символів, таких як число, пряма, точка й фундаментальні правила комбінування цих понять. Разом вони утворюють основу для побудови або визначення всіх упорядкованих стверджень й інших понять.

По своїй сутності формалізація близька до ідеалізації.

*Ідеалізація* як метод теоретичного дослідження. Щоб осмислити, що таке ідеалізація, необхідно усвідомити поняття "ідеальний об'єкт".

Термін "ідеальний" об'єкт був введений І.В. Кузнецовим, автором праць по методології фізики [15]. Він виявив особливий елемент структури теорії, названий ним ідеалізованим об'єктом, тобто абстрактною моделлю, наділеною невеликим числом дуже загальних властивостей і простою структурою.

Наведемо декілька відомих прикладів ідеальних об'єктів: хімічна формула відтворює в знаковій системі молекулярну структуру речовини, тобто предмет дослідження - молекулярна структура відтворюється в хімічній формулі; механіка, досліджуючи рух тіл, відволікається від якісних характеристичних тіл і представляє їх у вигляді матеріальних точок.

Ідеальні об'єкти не існують у дійсності. Наприклад: абсолютно тверде тіло, тверде тіло, абсолютно чорне тіло, чорне тіло, електричний заряд, лінія, точка й т.п.; вони лише подумки конструюються.

Уявне конструювання об'єктів такого роду називається *ідеалізацією*. Ідеалізація містить у собі момент абстрагування, що дозволяє розглядати ідеалізацію як вид діяльності, що абстрагує. Наприклад, говорячи про абсолютно чорне тіло, дослідник абстрагується від того факту, що всі реальні тіла тією чи іншою мірою мають здатність відбивати падаючий на них світ.

Ідеальні об'єкти мають ряд достоїнств й отримані в результаті складної розумової діяльності, вони дозволяють значно спростити складні системи, і складний процес представляється можливим представити як би в "чистому" вигляді, що значно полегшує виявлення істотних зв'язків, формулювання законів.

*Уявний експеримент* як метод дослідження. Уявний експеримент із ідеалізованими об'єктами є одним з найважливіших

методів теоретичного дослідження. Уявний експеримент - це система послідовних логічних операцій з метою розкриття його змісту, визначення співвідношень між елементами й виявлення закономірностей його руху.

Уявний експеримент як і реальний мають однакову мету - виявлення перетворень досліджуваного об'єкта залежно від якийсь умов.

*Аксіоматичний метод* є одним з найпоширеніших способів наукового пізнання. Особливо широко він застосовується в математичних науках.

Під аксіоматичним методом побудови наукової теорії розуміється така її організація, коли ряд тверджень приймається без доказів, а все інше знання виводиться з них за певних логічних правил. Прийняті без доказу положення називаються *аксіомами*, а інше, тобто вивідне знання фіксується у вигляді теорем, законів і т.п.

У різних наукових теоріях є група понять, які використовуються для визначення інших понять цієї теорії. Це так називаються фундаментальні або первинні поняття даної теорії, значення яких вважається відомим й у даній теорії не потребують визначення. Наприклад, у механіці Ньютона таким поняттям буде "сила", у геометрії Евкліда - поняття "точка", "пряма", "площина".

При аксіоматичному методі природно визначувана залежність одних понять і тверджень від інших понять і тверджень одержує свій розвиток і стає принципом побудови теорії. Аксіоми й первинні поняття утворюють базис теорії.

Аксіоматизація наукових теорій має велику пізнавальну цінність. Вона дозволяє ефективно й на строго логічній основі вирішувати проблему істинності положень теорії як проблему їхньої довідності.

Система аксіом, визначення й правила виводу аксіоматизованої системи повинні забезпечувати наступні методологічні вимоги:

- строгість, однозначність і достатність формулювання;
- несуперечність, тобто неможливо вивести два твердження, одне із яких було б запереченням іншого;
- повноту, тобто при даних правилах прийнятих аксіом досить, щоб на їхній основі довести або спростувати будь-яке

вираження, яке можна сформулювати мовою теорії;

- незалежність, тобто аксіоми повинні підбиратися так, щоб жодна з них не була наслідком з якого-небудь числа інших аксіом. У противному випадку, така аксіома є теоремою.

### 1.3.3. Загальнонаукові методи дослідження

До загальнонаукових методів, використовуваних і для емпіричного, і для теоретичного дослідження, відносять *абстрагування, аналіз, синтез, аналогію, індукцію, дедукцію, абдукцію, моделювання, історичний і логічний метод, метод графів*. Дамо їм коротку характеристику.

*Абстрагування*. Сутність цього методу в уявному відволіканні від несуттєвих властивостей, ознак, зв'язків, відносин досліджуваних об'єктів й явищ й в одночасному виділенні, фіксуванні одного або декількох істотних (цікавих для дослідника) сторін, властивостей об'єкта.

Розрізняють процес абстрагування й результат абстрагування, що називається абстракцією. Звичайно під абстракцією розуміється знання про деякі сторони об'єктів, а процес абстрагування - це сукупність розумових операцій, що ведуть до одержання такого результату, тобто абстракції.

Прикладами абстракції можуть служити безліч понять, який оперує людина не тільки в науці, але й у повсякденному житті: дерево, будинок, дорога, рідина і т.п.

Основна функція абстракцій полягає в тому, що вони:

- дозволяють замінити в пізнанні порівняно складне простим, але простим, що виражає в цьому складному основне;

- допомагають розібратися у всьому нескінченному різноманітті дійсності шляхом їхньої диференціації, шляхом виділення в них всіляких сторін і властивостей, шляхом установлення зв'язків і відносин між цими сторонами й властивостями, фіксації їх у процесі пізнання.

Умовно виділяються чотири *сходінки (щаблі) абстракції*, одержуваної інформації: феноменологічна (описова); аналітико-синтетична; прогностична; аксіоматична.

Щаблі абстракції - це міра науковості інформації.

Процес абстрагування тісно пов'язаний з іншими методами дослідження і перш за все з аналізом і синтезом.

*Аналіз і синтез.* Аналіз передбачає роздроблення цілого на складові елементи, тобто виділення ознак предмету для вивчення їх окремо як частини єдиного цілого. Строго проведений аналіз є серйозною гарантією логічності викладу матеріалу дослідження (дисертації, монографії).

Гіпотетичний аналіз здійснюється за допомогою дедукції. Дедуктивна посилка дозволяє розробити певну версію причинного ряду, що пояснює наслідки. Це важливо для дисертаційного дослідження. Версія гіпотетичного характеру виправдана, якщо припущення містить реалістичну ідею, виходить із варіантів, один із яких містить істину. Розробка версій необхідна тоді, коли самі по собі факти не дають подання про причини явища. Що часто тими або іншими сторонами не укладається в якісь нормативи, обумовлені теоретично. Тому виникає необхідність спочатку гіпотетично будувати аналіз.

Для дослідників-початківців можна рекомендувати наступний алгоритм аналізу:

- розробити об'єкт, що вивчається, або явище на частини і виявити зв'язки між частинами;
- виявити ознаки, властивості об'єкту;
- виявити 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 нагадує алгоритм для порівняння, тому, що аналіз і порівняння тісно пов'язані.

Уточнимо різницю між "*ознакою*" і "*властивістю*".

*Ознаками* називаються риси схожості або відмінності предметів: показник, прикмета, знак, по якому можна взяти, визначити що-небудь.

*Властивість* - якість, ознака, що становить характерну особливість чого-небудь.

*Синтез.* Аналіз і синтез виступають як плідні методи пізнання лише тоді, коли вони використовуються в тісній єдності. Для того щоб став можливим аналіз тієї або іншої речі, вона повинна бути зафіксована в нашій свідомості як деяке ціле, тобто попередньою умовою аналізу є цілісне, систематичне її сприйняття. І, навпаки, синтез можливий тоді, коли здійснений аналіз, коли



виділені ті або інші сторони й елементи деякого цілого. Отже, синтез являє собою з'єднання отриманих при аналізі частин у єдине ціле.

Методи аналізу й синтезу в науковій творчості можуть приймати різні форми залежно від ступеня пізнання об'єкта, від глибини проникнення в його сутність, звідси розрізняють:

- прямий або емпіричний аналіз і синтез;
- зворотний або елементарно-теоретичний аналіз і синтез;
- структурно-генетичний аналіз і синтез.

*Прямий або емпіричний аналіз і синтез* застосовуються на стадії поверхневого ознайомлення з об'єктом. При цьому здійснюються виокремлення частин об'єкта, виявлення його властивостей, найпростіші вимірювання, фіксація даних, що лежать на поверхні загального.

*Зворотний або елементарно-теоретичний аналіз і синтез* використовуються для досягнення моментів сутності явища. Аналіз і синтез тут базуються на деяких теоретичних міркуваннях, у якості яких можуть виступати припущення про причинно-наслідковий зв'язок різних явищ, про дію якої-небудь закономірності.

*Структурно-генетичний аналіз і синтез* дозволяють найбільш глибоко проникнути в сутність об'єкта. Тут ідуть далі припущення про деякий причинно-наслідковий зв'язок. Цей вид аналізу й синтезу вимагає вичленовування в складному явищі таких елементів, таких ланок, які представляють саме головне, саме центральне в них, їх "клітинки", "ядро", що робить вирішальний вплив на всі інші сторони сутності об'єкта.

Поняття *аналогія* (гр., *analogia* - відповідність), у більш широкому значенні, вживається як подібність, відповідність, подоба предметів й явищ.

Пізнавальне значення аналогії обумовлюється тим, що вона виступає одним з активних методів дослідження переважно на початковому етапі процесу пізнання.

Першим кроком у висновках за аналогією є порівняння. Воно дозволяє при порівнянні предметів виявити характер спільності і розходження між ними.

Науці відомо чимало відкриттів і технічних винаходів, дослідження яких починалося з аналогій. Наприклад, подібність між явищами в електричній машині й блискавкою привели

Франкліна до винаходу громовідводу. Тисячі речовин створені хіміками за аналогією їх із природними сполуками.

Аналогія є засобом конкретизації думки. Зміст аналогії полягає в тім, щоб знаходити невідомі ознаки, опираючись на раніш придбані знання о іншому, подібному з ним предметі або явищі, переносити інформацію від одного предмета на іншій на основі деякого співвідношення між ними.

Залежно від характеру перенесення інформації розрізняються типи аналогій:

- каузальна аналогія, у якій аналогічними виявляються явища, породжувані однаковими причинами;
- функціонально-структурна аналогія, у якій структури систем ототожнюються на основі тотожності їхніх функцій;
- структурно-функціональна аналогія, у якій, навпаки, функції ототожнюються на основі тотожності структури.

Висновки, зроблені за аналогією, носять імовірнісний характер. Імовірне знання має численні градації, починаючи від малоімовірних, ненадійних знань і кінчаючи рівнем, що межує із достовірними знаннями.

Підвищення ймовірності висновків за аналогією залежить від кількості розглянутих подібних ознак у порівнюваних явищ і від ступеня істотності цих ознак.

Варто враховувати одну досить істотну обставину. Чим більше подібності між порівнюваними предметами, тим менше евристична цінність аналогії. У теорії моделювання, наприклад, прийнято вважати, що занадто віддалена модель може ввести в оману, а занадто "точна" втрачає своє значення, стає марною.

До методу аналогії близький інший метод - *екстраполяція*. *Екстраполяція* - це поширення висновків, отриманих зі спостереження над однією частиною явища, на іншу його частину.

*Індукція й дедукція*. У дисертаційних дослідженнях індукція і дедукція рідко позначаються як методи дослідження, мабуть тому, що їх вважають звичайними видами висновку.

*Індукція* - це спосіб міркування від більш приватних суджень до більш загального судження, установлення загальних правил і законів на підставі вивчення окремих фактів й явищ. Вона починається з нагромадження знань про якнайбільше число в дечому однорідних предметів й явищ. Узагальнюючи подібні

факти, людина робить твердження про приналежності даної ознаки всім предметам, що входять у даний клас. Наприклад, узагальнюючи, що мідь, залізо, олово, срібло й інші метали проводять електрику, з'являється висновок про те, що всі метали електропровідні.

*Дедукція* - це спосіб міркування від загального судження до приватного судження, пізнання окремих фактів й явищ на підставі знання загальних законів і правил.

Приклад *дедуктивного умовиводу*: "Всі метали електропровідні. Залізо - метал. Отже, залізо електропровідне".

Різниця між індукцією й дедукцією в протилежній спрямованості ходу думки. Узагальнюючи емпіричний матеріал, що накоплено, індукція підготовляє ґрунт для висунення припущень про причину досліджуваних явищ, а дедукція, теоретично обґрунтовуючи отримані індуктивним шляхом висновки, зменшує їхній гіпотетичний характер і перетворює в достовірне знання.

Розрізняють *повну* і *неповну* індукцію. Повна індукція полягає в розгляді кожного випадку, кожного предмету, що входить в клас явищ, і оскільки окремих випадків безліч, узагальнення робиться на основі вивчення типових випадків. Неповна індукція має місце, коли висновок про клас предметів робиться виходячи з розгляду лише деяких предметів даного класу. В цьому випадку аналізуються їх суттєві ознаки, зв'язки і тому подібне. Неповна індукція має широке застосування, але вона не дає достовірного висновку.

Дедукція вважається найкоротшим шляхом до пізнання, у цьому її характерна перевага. Її структура складається із трьох суджень:

- загального положення, іменованого великою посилкою;
- пов'язаного з ним судження, що призводить до його застосування і відомого за назвою малої посилки;
- висновку.

*Абдукція* - спосіб міркування від наявних даних до гіпотези, що пояснює або оцінює їх краще, ніж альтернативні гіпотези. Є інший варіант визначення: *абдукція* - це міркування, що здійснюється на підставі інформації, що описує певні факти або дані й приводить до гіпотези.

На перший погляд може здатися, що абдукція нічим не відрізняється від індукції, у якій висновок робиться на основі узагальнених фактів і тому також має характер гіпотези. Але це чисто формальна подібність. Звичайна індукція просто перераховує факти, що мають деяку загальну ознаку, але не пояснює їх. Абдуктивне міркування широко використовується й у повсякденному мисленні, у всіх випадках, коли доводиться звертатися до гіпотез. Коли лікар ставить діагноз на основі симптомів захворювання він, власне кажучи, робить абдуктивне умовисновок, тобто розглядаючи симптоми як взаємозалежну систему фактів, він намагається знайти їм пояснення за допомогою діагнозу передбачуваної хвороби. Можна сказати й так, що симптоми виступають як безпосередньо спостережувані факти, наслідки, а хвороба - як їхня причина.

Використання абдукції в науці має, на думку вчених, більш складний характер, тому що в ній:

- у якості посилки для висновку можуть виступати як емпіричні факти, так і засновані на них узагальнення й емпіричні гіпотези;

- рівень пояснення фактів зростає в міру переходу від емпіричних гіпотез до теоретичних. Наприклад, гіпотеза Кеплера про рух планет була заснована на ретельних спостереженнях і змінах рухів планети Марс, виконаних Тихо Бразі (датським астрономом). Тому вона змогла пояснити еліптичну орбіту й інші закономірності руху планет Сонячної системи.

Альтернативною вважалася найпоширеніша гіпотеза про рух планет по круговій орбіті, хоча допускалися й інші форми (овал, овоїд).

Абдукція вважається деякими вітчизняними і закордонними авторами універсальною логічною схемою пошуку пояснювальних гіпотез і головна відмінність абдукції від таких традиційних форм умовиводів, як індукція й дедукція, вони бачать у її орієнтації на пояснення досліджуваних фактів. Саме виявлення нових фактів змушує в повсякденному житті робити припущення, а в науці - більш обґрунтовані гіпотези, які пояснюють ці факти.

На відміну від традиційного погляду, що розглядає індукцію як висновок від часткового до загального, Пірс Чарльз (американський філософ, логік, математик і природознавець)

визначав її як логічну операцію підтвердження гіпотез, що зближує його точку зору із сучасною індуктивною (імовірнісною) логікою.

В абдуктивному висновку дедукція й індукція виступають спільно, тобто дедукція служить для виводу наслідків з гіпотези, запропонованої для пояснення нових фактів, а індукція - підтверджує або спростовує цю гіпотезу й тим самим коректує її. Звідси стає очевидним, що абдукція являє собою процес, у ході якого відбувається модифікація й корекція гіпотез.

*Моделювання* - особливий і досить універсальний метод наукового пізнання, що припускає вивчення об'єкта (оригіналу) шляхом створення й дослідження його копії (моделі), що заміщає оригінал з певних сторін, що цікавлять дослідника. Моделювання - це метод створення й дослідження моделі.

Визначення "модель" має декілька значень.

*Модель* (ф. *modffle*, і. *modello*): 1) зразок; 2) відтворення предмета в зменшеному або збільшеному вигляді; 3) предмет винаходу в мистецтві, натурщик, натурниця, що позують перед художником; 4) у ливарній справі - зразок того предмета, який потрібно відлити; 5) геометричне креслення, що дає наочне уявлення про який-небудь фізичний об'єкт або процес.

У процесі пізнання модель виступає, насамперед, як джерело інформації про оригінал і служить засобом її фіксації. Однак не слід бачити сутність моделі у її подібності з оригіналом. Моделі - це такі аналоги, що суттєво подібні оригіналу, а відмінності не суттєві відповідно умов конкретної пізнавальної задачі.

Наукова модель - це подумки представлена або матеріально реалізована система, що адекватно відображає предмет дослідження і здатна заміщати його настільки, що вивчення моделі дозволяє одержувати нову інформацію про об'єкт.

Модельне дослідження має наступну структуру: постановка задачі; створення або вибір моделі; дослідження моделі; перенесення знання з моделі на оригінал.

За допомогою моделей можуть досліджуватися будь-які об'єкти. Але принципова неповнота, фрагментарність моделей не дозволяє одержувати цілковитого знання про оригінал. Тільки в сполученні з іншими методами пізнання й у сполученні з безпосереднім дослідженням оригіналу метод моделювання може бути плідним.

Головна перевага моделювання - цілісність подання інформації.

Власне кажучи моделювання служить трьома цілям:

*евристичній* - для класифікації, позначення, знаходження нових законів, побудови нових теорій й інтерпретації отриманих даних;

*обчислювальній* - для вирішення обчислювальних проблем за допомогою моделей;

*експериментальній* - для вирішення проблеми емпіричної перевірки (верифікації) гіпотези за допомогою оперування з тими або іншими моделями.

В останні роки розширився спектр форм, що відносяться до моделювання: схеми, креслення, короткі описи (схема - конспекти), математичні формули, матриці, символи, графи і т. д.

*Історичний і логічний методи* наукового пізнання використовуються тільки там, де так чи інакше предметом дослідження стає історія об'єкта.

*Логічний метод дослідження* тісно пов'язаний з історичним, і він визначається як метод відтворення, реконструювання в мисленні, свідомості складного об'єкта, що розвивається (або, що розвивалося) у формі історичної теорії. Для цього можуть використовуватися найрізноманітніші пізнавальні операції й методи. На відміну від історичного методу, при логічному дослідженні об'єкта дослідник відволікається, абстрагується від всіх історичних випадків, окремих фактів, зигзагів, і з історії виокремлюється саме головне, визначальне, істотне.

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

Розглянемо більш детально два методологічні підходи, як найбільш актуальні для науково-технічних досліджень - це системно-структурний і синергетичний підхід. Ці підходи в останні роки стали предметом теоретичного осмислення вітчизняних і закордонних учених.

##### **1.4.1. Системно-структурний підхід**

У сучасних умовах у науці і практиці все частіше використовують системний підхід. Він ґрунтується на дослідженнях із загальної теорії систем, проведених ще на початку ХХ століття А.І. Бергом, Л. Берталанфі, Н. Вінером, К. Боулдінгом

та ін. Ці дослідження послужили науковою основою для робіт в області біологічних, соціально-політичних, технічних та інших наук. Крім того завдяки їм термін "системний підхід", що являється в цей час дуже поширеним, увійшов у науковий ужиток.

Системний підхід є одним з важливих механізмів, що забезпечують інтеграцію наукових знань.

Поняття "система" має ряд визначень:

- сукупність (комплекс) елементів, що вступають у взаємодію (Л. Берталанфі);

- сукупність елементів, між якими є відносини об'єктів і їхніх властивостей (А. Хол та ін.);

- сукупність матеріальних або ідеальних об'єктів, взаємозв'язок і взаємодія яких приводить до виникнення нових інтегрованих властивостей системи, які відсутні в складових її об'єктів (В.Г. Афанасьєв).

Структурою системи називають зв'язок і взаємодію між її елементами, завдяки яким виникають нові інтегровані властивості системи, відсутні у її елементів. Щоб підкреслити відмінність знову виникаючих властивостей від властивостей її елементів, учені називають їх *емерджентними* (*емерджентність* – це якість, властивості системи, кожна з яких не властива її елементам, а виникають вони завдяки об'єднанню цих елементів в єдину, цілісну систему) властивостями.

Кожна система в реальному світі взаємодіє з навколишнім середовищем - тілами, явищами, подіями, які певним чином впливають на процеси, що протікають у ній.

Системою і структурою володіють і окремі концепції, і теорії в будь-якій науці. Як структурні елементи теорії виступають поняття, закони, узагальнення, гіпотези, факти.

Структурою теорії є логічний взаємозв'язок, що існує між її поняттями й судженнями.

Природу, структуру і властивості систем можна представити наступним чином:

- *природа і сутність систем*

природні або штучні, закриті або відкриті, абстрактні (наприклад, поняття) або конкретні (хоча б два їхні елементи - об'єкти), статичні (незмінність властивостей у часі) або динамічні, без оруді або централізовані, сумативні (упорядкованість,

послідовність чого-небудь) або активні (взаємодія як мінімум двох компонентів);

- *призначення систем*

мета і доцільність (до чого прагне), завдання які потрібно розв'язувати (що переборює, усуває), функції (для чого призначена), функціонування, розвиток і саморозвиток (як повинна діяти і змінюватися);

- *структура (організація) систем*

об'єкти (суб'єкти), частини або компоненти, атрибути (властивості складових її об'єктів), відносини або взаємодії (поєднують систему в ціле), наявність двох і більше видів зв'язку (прямий і зворотний зв'язок), наявність рівнів ієрархії і ієрархія рівнів;

- *властивості (якості, основні характеристики) систем*

цілісність (сумативність плюс взаємозумовленість), сумісність або несумісність із іншими системами, стабільність (стійкість зворотного зв'язку), адаптація (приспособлення до навколишнього середовища, реакція на навколишнє середовище і її вплив), навчання, здатність до вдосконалювання, еволюція (мінливість у часі).

Сучасне природознавство розрізняє прості й складні системи. Приміром, теорія відносності, що вивчає універсальні фізичні закономірності, властиві для всього Всесвіту, і квантова механіка, що вивчає закони мікросвіту - і та й інші, хоча й нелегкі для розуміння аматорам, все ж таки вважаються простими системами. Простими в тому розумінні, що в них входить невелике число змінних (елементів), і тому взаємини між ними піддаються математичній обробці і встановленню універсальних законів.

Складні системи складаються з великого числа змінних (елементів) і, відповідно з великої кількості зв'язків між ними. Чим більша кількість зв'язків, тим суужніше піддається предмет дослідження досягненню кінцевого результату - встановленню закономірностей функціонування даного об'єкту.

Труднощі вивчення складних систем пов'язані і з тим, що, чим складнішою є система, тим більше вона має емерджентних властивостей, тобто, як відзначалося вище, властивостей, яких немає її частини і які є проявом ефекту цілісності системи.

Такі складні системи вивчаються, наприклад, метеорологією



- наукою про кліматичні процеси.

Поділ систем на прості і складні вважається фундаментальним у природознавстві. Серед всіх складних систем найбільший інтерес представляють системи зі зворотним зв'язком.

Деякі вчені вважають за необхідне розрізняти сумативну систему і активну (В.П. Сімонов). Під сумативною системою розуміється впорядковане розташування чого-небудь у певній послідовності. У таких системах при доповненні або вилученні окремих елементів ні сама система в цілому, ні її компоненти не зазнають серйозних змін, наприклад, систематичний книжковий каталог, словники, довідники і т.д.

Під активною системою розуміється така система, сутність якої характеризується в такому визначенні - сукупність об'єктів, взаємодія яких сприяє появі нових інтегральних якостей, не властивих окремим компонентам, що утворюють систему.

Система вважається відкритою, якщо вона обмінюється з навколишнім середовищем речовиною, енергією або інформацією, і навпаки, закритою, якщо до неї не надходить і з неї не виділяється енергія в будь-якій формі: у формі інформації, тепла, фізичних матеріалів і т.д., і, отже, компоненти її не змінюються.

Всі природні системи вважаються закритими. Вони підлягають тільки природним об'єктивним законам, а штучні - відкритими, тобто в них діють і суб'єктивні закони, принципи, правила, установлені самою людиною.

Таким чином, основними принципами системного підходу до дослідження є:

- підхід до досліджуваної проблеми як до цілого і уявлення, що впливають звідси, про середовище системи і її елементів;

- поняття системи конкретизується через поняття "зв'язки"; серед різних типів зв'язків особливе місце займають системоутворювальні зв'язки;

- стійкі зв'язки утворюють структуру системи, тобто забезпечують її впорядкованість; спрямованість цієї впорядкованості характеризує організацію системи;

- структура, у свою чергу, може характеризуватися як по горизонталі (зв'язки між однотипними компонентами системи), так і по вертикалі; вертикальна структура припускає виділення різних рівнів системи і наявність ієрархії цих рівнів;

- зв'язок між різними рівнями реалізується за допомогою керування.

#### 1.4.2. Синергетичний підхід

Поняття "синергетика" введене в ужиток науки німецьким фізиком Г. Хакеном, а як самостійна наука синергетика з'явилася в 70-х роках ХХ століття. Значний внесок у розвиток синергетики вніс І. Пригожий - бельгійський учений.

Досліджуючи процеси самоорганізації в неживій і живій природі, І. Пригожий уперше створює і обґрунтовує науковий апарат, що довів можливість протікання даних процесів у фізично невірноважених системах. Подальші дослідження в області хімії і біології підтвердили правомірність висунутих ученим положень і дозволили сформулювати принципи, завдяки яким процес, що протікає, може мати здатність до самоорганізації.

Синергетика за останні роки вийшла за рамки однієї науки і стала надбанням міждисциплінарних досліджень. Вона спрямована на розкриття універсальних механізмів самоорганізації складних систем, у тому числі *когнітивних* (*когнітивні* – це пов'язані зі свідомістю, з мисленням). Концепція синергетичного бачення світу приваблює сьогодні вчених з різних областей знань: філософії, фізики, хімії, біології, психології і т.д.

Розглянемо особливості синергетичного підходу.

У стислому визначенні синергетику трактують як теорію самоорганізації. У більш розгорнутому визначенні - це наука, що досліджує процеси мимовільного переходу складних систем з менш упорядкованого, не рівноважного стану в більш впорядкований, що розкриває такі зв'язки між елементами цієї системи, при яких їхня сумарна дія в рамках системи перевищує по своєму ефекту просте додавання ефектів дій кожного елемента окремо.

Щоб краще зрозуміти генезис синергетики, зробимо невеликий екскурс у класичну термодинаміку, що вивчала в ХІХ столітті механічну дію теплоти, розглядаючи закриті системи, що прагнуть до стану рівноваги, упорядкованості. В ХХ столітті термодинаміка стала вивчати відкриті системи в нерівноважних, неупорядкованих станах. Цей напрямок у термодинаміці одержав назву "синергетика" (від греч. *sinergia* -співробітництво, спільна

дія).

Синергетика намагається відповісти на запитання, як утворилися всі ті макросистеми, у яких ми живемо. Вона змінила уявлення про світ, про народження матерії, походження і еволюцію Всесвіту, Землі, життя на землі, про природу і еволюцію людини.

З погляду синергетики, багатоваріативність, розмаїтість шляхів, випадковість, навіть хаотичність (безладдя), альтернативи є конструктивними складовими механізмів самоорганізації складних систем. Концепція самоорганізації виділяє універсальні закономірності для всіх явищ, де превалюють неврівноваженість, нелінійність (багатоваріантність), флуктуації (випадкові зміни, відхилення) і біфуркації (від лат. *furcatus* - розділений; переломна точка в розвитку системи). Область синергетики, таким чином, охоплює всі явища, у яких яким-небудь образом присутні асиметрія, антиномії.

Об'єктами вивчення синергетики є: складність і дисипація (упорядковані структури), хаос і упорядкованість, стійкість і неврівноваженість, флуктуація і атрактори (власна тенденція розвитку системи), біфуркація і керуючі параметри.

Синергетика підтверджує висновок теорії відносності про те, що енергія творить більш високі й тонкі рівні організації. Вона сформулювала принцип саморуху в неживій природі. Механізм, що нею пропонується - це спонтанна флуктуація, подія в точці біфуркації, експонентний процес до певного моменту.

Для кращого осмислення, уточнимо поняття флуктуації.

*Флуктуація* (від лат. *fluctuatio* - коливання) - випадкове відхилення від рівномірного розподілу, наприклад, молекул у газі або рідині, що виникає в результаті теплового руху.

Із сучасної наукової точки зору, народження Всесвіту відбувалося через флуктуацію у вакуумі. Сучасна квантова механіка припускає, що вакуум може приходити в "збуджений стан", внаслідок чого в ньому може утворитися поле, а з нього - речовина (останнє підтверджується сучасними фізичними експериментами).

Відповідно до новітньої концепції фізичного вакууму, останній має особливу творчу функцію - споконвічну здатність, породжувати із себе всесвіти, невичерпне різноманіття яких утворить Надвсесвіт. Первісний фізичний вакуум, що поклав

початок Всесвіту, має, відповідно до уявлень квантової теорії поля, досить складну будову: у ньому є кілька поверхів, кожний з яких має свій енергетичний потенціал. Елементарні частки, з яких складається речовина і антиречовина, є збудженими станами вакууму.

Завдяки флуктуаціям вакуум набуває особливої властивості - конкуренції між нестійкістю через флуктуацію і колишньою стійкістю. Перевершивши поріг стійкості завдяки флуктуації, вакуум (вона ж система) попадає в критичний стан, що називається точкою біфуркації. Ще якась невелика флуктуація в цій точці біфуркації могла б послужити початком правибуху або Великого вибуху праатома, початком еволюції в зовсім новому напрямку. Це і є подія в точці біфуркації, початок творчих актів.

У переломний момент, тобто в точці біфуркації, неможливо пророчити, у якому напрямку буде відбуватися подальший розвиток: чи стане стан системи більш хаотичним і припинить своє існування або вона перейде на більш високий рівень упорядкованості (організації), що називають дисипативною структурою.

Значне місце в синергетиці приділяється хаосу. З погляду синергетики, хаос необхідний, щоб система вийшла на аттрактор (аттрактор – це точка притягання), щоб ініціювати самодобудовування системи. Хаос необхідний для існування порядку.

Для пояснення переходу від хаосу до порядку в процесі самоорганізації існує поняття "детермінований хаос". Саме стан детермінованого хаосу вважається фізично нормальним для всіх систем. Але і повний хаос, і надпорядок вважаються небажаними, а іноді і небезпечними.

Відмінності неврівноваженої структури від рівноважної полягає в наступному:

- система реагує на зовнішні умови;
- поведінка системи випадкова і не залежить від початкових умов, але залежить від передісторії;
- приплив енергії створює в системі порядок, і стало бути ентропія її зменшується;
- наявність біфуркації - переломної точки в розвитку системи;

- когерентність: система поводитья як єдине ціле і так, якби вона мала далекодіючі сили.

З позиції синергетики всі системи містять підсистеми, які постійно змінюються, флюктують. Іноді окрема флюктуація або її комбінація може стати настільки сильною, що існуюча колись організація не витримує й руйнується.

Отже, основні ідеї синергетики:

- порядок народжується з хаосу, існує глибинний взаємозв'язок хаосу і порядку;

- флюктуація являється творцем організації, випадковість грає в еволюційних процесах конструктивну роль;

- розмаїтість лежить в основі стійкого і дисциплінованого розвитку систем;

- еволюція нелінійна (багатоваріантна);

- розвиток систем як в історичній ретроспективі, так й у перспективі нелінійний, тобто має альтернативи;

- світ і наукове знання про нього системні, цілісні;

- розвиток об'єктів всіх рівнів матеріальної і духовної організації протікає за загальними закономірностями.

Основними вихідними принципами синергетики, тобто самоорганізації, являються наступні:

- для самоорганізації система має бути відкритою, тобто такою, що обмінюється зі своїм оточенням речовиною, енергією, інформацією;

- самоорганізація завжди пов'язана з кооперативним процесом, колективним погодженим поведженням частин системи. Саме завдяки такому поведженню виникають нові структури;

- випадковість, реальна ситуація є конструктивним початком, основою для процесу розвитку. Процес самоорганізації відбувається в результаті взаємодії випадковості і необхідності і завжди пов'язаний з переходом від нестійкості до стійкості;

- навколишній світ еволюціонує за нелінійними законами, тобто різноманітним шляхом вибору з альтернатив.

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

1. Перелічіть методи емпіричного і теоретичного пізнання.

2. Види наукових досліджень і їхня класифікація.

3. Сформулюйте визначення поняття метод наукових

досліджень.

4. Приведіть класифікацію методів наукового дослідження.

5. Назвіть загальнонаукові методи дослідження.

6. Дайте характеристику методів емпіричного дослідження.

7. Перелічіть і дайте характеристику методів теоретичного дослідження.

8. Опишіть метод аналізу і синтезу.

9. Що таке синергетичний підхід у наукових дослідженнях?

Для вивчення яких систем цей підхід застосовується?

10. Дайте характеристику методологічним підходам, що використовуються в області технічних наук.

## РОЗДІЛ 2

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

У даному розділі представлені в загальному виді послідовність рішення проектних задач, методи для кожного етапу проектування виробу, підходи з коректної постановки задачі, її аналізу й вирішенню технічних протиріч для забезпечення плідного їх вирішення.

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

Для забезпечення аналізу задач, що виконуються при проектуванні виробу (технічної системи), розглянемо їхню класифікацію. Для цього технічну задачу представимо у вигляді системи, що складається із трьох елементів: *A* - вплив; *B* - об'єкт, що піддають перетворенню; *C* - результат, що хочуть одержати завдяки перетворенню об'єкта.

Творчий процес рішення задачі передбачає пошук рішення в умовах невизначеності, нестачі інформації, однак ступінь невизначеності може бути різним і відноситися вона може до різних її елементів. Наприклад, відомі перетворення й впливи *A* і матеріальний об'єкт *B*, але невідомий результат *C*. Якщо мова йде про фізичний результат, значення якого-небудь фізичного параметра об'єкта, то зазначений стан елементів *A*, *B*, *C*, характеризує умови стандартної науково-дослідної задачі: визначені фактори і величини їхньої зміни, відомий сам об'єкт (технічна система, матеріал), параметри якого досліджують, розроблена програма дослідження - невідоме значення параметрів, їхній взаємозв'язок з факторами (визначення їх - ціль дослідження). Якщо ж мова йде про технічний результат, зміну технічних і техніко-економічних показників (продуктивності, терміну служби виробу, енергоємності і т.д.), то такий стан елементів *A*, *B*, *C*, відповідає винахідницькій задачі.

Розглянемо декілька прикладів.

1) Відомо, що при нагріванні *A* всі тіла *B* розширюються, невідомий технічний результат *C*, що може бути отриманий при використанні ефекту теплового розширення. У цій ситуації його

виявлення, наприклад передача точних мікропереміщень об'єкту під об'єктивом мікроскопа, може дати технічне рішення: пристрій для мікропереміщення об'єктів, що містить стрижень із нагрівачем, один кінець якого зв'язаний з об'єктом, а інший жорстко закріплений (авт. св. № 242127).

2) Визначені впливи  $A$ , відомий технічний результат  $C$ , невідомий об'єкт  $B$ . У цьому випадку технічна задача може бути вирішена вибором (застосуванням, розробкою) нового матеріалу або конкретної технічної системи (вузла, агрегату), при відомому впливі  $A$  на нього, що визначає досягнення результату  $C$ . Наприклад, необхідний результат  $C$  - зниження коефіцієнта тертя й коефіцієнта теплопередачі між гарячим деформовуваним металом і холодним інструментом (оправкою) при прокатці труб (цим забезпечується зменшення енергосилових параметрів процесу, зменшення розігріву і зношування інструмента). Для досягнення такого результату необхідно змащення  $B$  нанести на поверхню оправки (нанесення мастила - це тип впливу  $A$ , він відомий). Приміром, задача вирішується розробкою або вибором конкретної мастильної речовини, яким став, наприклад, порошок триполіфосфата натрію (авт. св. № 324086).

3) Відомі матеріальний об'єкт  $B$  і необхідний результат  $C$ , невідомо, як перетворити об'єкт  $B$  (вплинути на нього), щоб досягти  $C$ , тобто невідомо  $A$ . Це типова винахідницька задача - перетворення технічного об'єкта проводиться з певною метою. Наприклад,  $C$  - зручність транспортування стружки від металорізальних верстатів,  $B$  - стружка. Приміром, задача вирішується впливом  $A$  на стружку  $B$  біжним магнітним полем (авт. св. № 716937).

Три наведені випадки ілюструють один із крайніх станів, коли не визначений лише один із трьох компонентів задачі. На практиці ж частіше зустрічаються випадки, при яких невизначених компонентів більше одного. Для усунення цієї невизначеності вводиться таке поняття, як коефіцієнт визначеності  $K$ , що характеризує кількісно наявну інформацію, необхідну для правильного вибору елемента технічної задачі (якщо  $K = 1$  - елемент цілком визначений, якщо  $K = 0$  - цілковита невизначеність у виборі потрібного елемента). При застосуванні його до кожного з елементів  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , то утворюється набір показників:  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$  -



коефіцієнти визначеності впливів, об'єктів і результатів. Дана сукупність показників може характеризувати клас, рівень і стан технічної задачі, а їхній добуток дає коефіцієнт визначеності всієї задачі  $K_{\text{авс}}$  ( $K_a \times K_b \times K_c = K_{\text{авс}}$ ). Чим вище  $K$ , тим тривіальніше технічна задача, тим менш винахідницькою вона є. Коли  $K_{\text{авс}} \rightarrow 1$ , ми маємо справу із самою звичайною інженерною задачею, усі компоненти якої, практично повністю визначені.

Творчий рівень технічного рішення можна оцінювати по кількості проб і помилок, необхідних для знаходження потрібного варіанта. Тоді коефіцієнт визначеності  $K$  можна представити як величину, зворотну кількості проб  $N$ :  $K_a = 1 / N_a$ ;  $K_b = 1 / N_b$ ;  $K_c = 1 / N_c$  ( $N_a$  - кількість варіантів перетворень;  $N_b$  - кількість варіантів об'єктів, матеріалів;  $N_c$  - кількість варіантів результатів, технічних параметрів).

У міру відбраковування випробуваних варіантів, "порожніх проб", коефіцієнт визначеності задачі росте за рахунок зменшення числа варіантів, що залишилися.

Практика рішення проектних задач показує, що людина, що засвоїла основні існуючі прийоми і методи пошуку нових технічних рішень і має певний винахідницький досвід, користується не всіма прийомами і процедурами, що пропонують відомі методики, а лише їх окремими найбільш сильними розділами (блоками), розставленими в певній послідовності (вона може мінятися залежно від типу проблемної ситуації). Виробляється як би свій власний скорочений варіант "алгоритму".

У той же час дослідження, проведені інженерами (винахідниками), мають ряд загальних етапів, рис і використовуваних прийомів, що дозволяє представити процес рішення технічної задачі у вигляді схеми, що складає з декількох найбільш характерних частин (рис. 1).

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

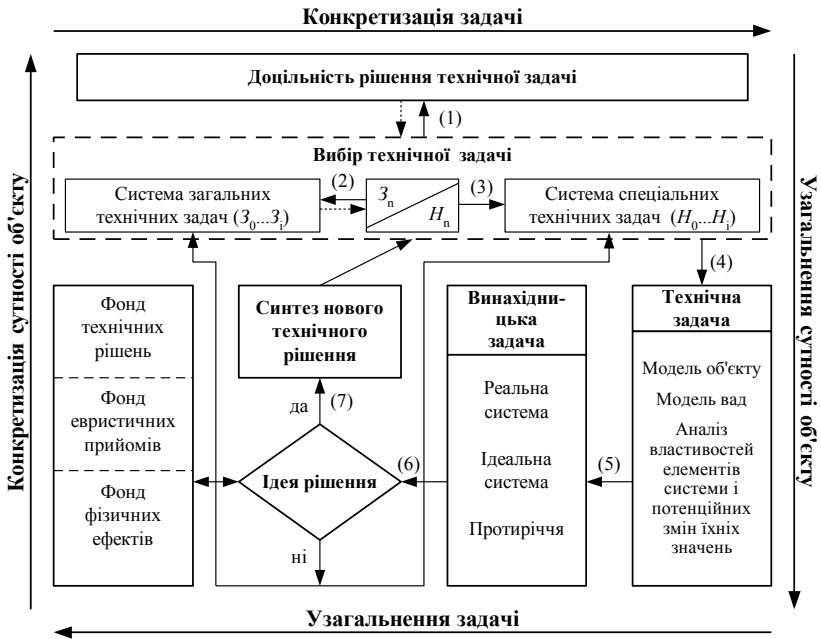


Рисунок 1 – Схема циклу рішення технічної задачі [29].  
Опис етапів 1 – 7 представлено в табл. 1.

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

Етап	Найменування і зміст етапу	Методологічні засоби
0	<i>Виявлення недоліку</i> Аналіз технічних потреб споживачів і технічних можливостей системи, їхнє порівняння, формулювання протиріччя між ними.	Узагальнений евристичний алгоритм. Обернений мозковий штурм.
1	<i>Визначення доцільності рішення</i> Аналіз технічних, техніко-економічних, економічних, соціальних і інших показників виконуваної роботи; корисності і	Узагальнений евристичний алгоритм.

Продовження табл. 1

Етап	Найменування і зміст етапу	Методологічні засоби
	ефективності від усунення вад, можливих витрат на проведення роботи.	
2	<i>Аналіз надсистеми</i> Виявлення зв'язків технічної системи з іншими системами, аналіз сукупності цих систем на початковому і більш високих ієрархічних рівнях.	Морфологічний аналіз. Способи і методи системного аналізу.
3	<i>Аналіз системи і підсистем, вибір задачі</i> Визначення структури технічної системи і її елементів на різних ієрархічних рівнях. Аналіз сукупності виникаючих технічних задач, оцінка доцільності рішення кожної з них, вибір конкретного технічної задачі.	Морфологічний аналіз. Способи і методи системного аналізу. Побудова логічних ланцюгів причинно-наслідкових зв'язків вад із їхніми причинами. Узагальнений евристичний алгоритм.
4	<i>Аналіз технічної задачі</i> Аналіз структури об'єкту, побудова його моделі, визначення можливостей його перетворення.	Узагальнений евристичний алгоритм. Морфологічний аналіз. Способи і методи теорії подоби і моделювання, експериментальних і теоретичних досліджень.
5	<i>Формулювання умов винахідницької задачі</i> Характеристика технічної системи і формулювання ідеального результату, виявлення і уточнення технічного протиріччя.	Узагальнений евристичний алгоритм
6	<i>Пошук ідеї рішення</i> Зіставлення винахідницької задачі з вирішеними технічними задачами, пошук аналогів. Вибір шляхів	Фонд фізичних ефектів. Фонд технічних рішень. Фонд евристичних способів і таблиці усунення

Продолжение табл. 1

Етап	Найменування і зміст етапу	Методологічні засоби
6	досягнення ідеального результату і нових принципів дії.	технічного протиріччя. Узагальнений евристичний алгоритм. Мозковий штурм. Синектика. Метод контрольних питань. Асоціативні методи пошуку технічних рішень. Морфологічний аналіз.
7	<i>Синтез нового технічного рішення.</i> Закріплення функцій, необхідних для ідеї рішення (принципу дії), за елементами технічної системи і їхнє перетворення	Морфологічний аналіз. Синтез технічної системи із залученням матриці потенційних змін властивостей елементів системи. Узагальнений евристичний алгоритм.

## 2.2. Постановка задачі

Коли можливості будь-якої технічної системи не відповідають (або не стануть у майбутньому відповідати) споживним потребам, то вона стає потенційним об'єктом рішення науково-технічної задачі, ціль якої - усунення виявленої вади.

При виявленні технічних вад зростаючу роль грають методи науково-технічного прогнозування, що дозволяють пророчити попит споживачів, технічні можливості системи і невідповідність між ними в більш-менш віддаленому майбутньому, з "поправкою на час" [30]. Прогнозування - форма творчої діяльності, що дозволяє вчасно (з випередженням) поставити нові задачі і вирішити їх до моменту прояву вади.

Слід відзначити, що успішний прогноз задач, які ще не мають практичної важливості сьогодні, забезпечує, як правило, і новизну рішень і полегшує їхній правовий захист.

У зв'язку з існуванням певної структури технічної системи,

їхньої сукупності і ієрархії, а також параметрів, що характеризують технічну і суспільну (потреб споживачів) системи, виникає ряд пов'язаних з ними і похідних від них систем: технічних вад і їхніх причин, задач і цілей. Вони також володіють відповідною технічним системам структурою (елементами і зв'язками між ними) і ієрархією: якісь технічні вади і задачі є частками стосовно одного або декількох більш загальних, але є і ще більш загальні, і ще більш спеціальні.

Вибір технічної задачі припускає попередній аналіз системи задач і у такій формі стає творчим етапом, від успіхів якого істотно залежить і кінцевий результат.

Іноді задачі пропонуються у варіанті вже обраному кимось. Наприклад, одна із задач: "Дахи від снігу очищають вручну лопатами, що трудомістко і небезпечно. Необхідно запропонувати механізм для очищення дахів від снігу". При уважному аналізі виявляється, що ця задача походить не від вади, пов'язаної з ручною працею по очищенню, а від вихідної вади, властивої системі: по краях даху при таненні снігу утворюється намерзлий лід (бурульки), що становить небезпеку для людей, що знаходяться унизу, а потала вода псує стіни під карнизом.

При цьому технічна задача щодо запобігання намерзлого льоду по краях даху є більш загальною стосовно спочатку сформульованого і породжує обхідні варіанти.

Перевірка обхідних варіантів узагальненням, розглядом сукупності задач у надсистемі дозволяє усунути помилки, зроблені при формулюванні спеціальних задач, і знаходити ефективні шляхи рішення більш загальних проблем.

У згаданому випадку, одним із правильних і вдалих рішень став спосіб видалення снігу з даху (авт. св. № 750013), по якому пропонується використовувати тепломережу в будинках з верхнім розведенням для обігріву даху (при цьому дах повинен бути похилим і з лійкою для відводу води).

Тут ми зіштовхуємося з поняттям "обхідна задача" - тобто така, що впливає не з вихідної, спочатку сформульованої, а з більш загальної задачі, стосовно якої обидві вони є спеціальними (паралельними).

Наочно обхідний шлях можна продемонструвати в такий спосіб. Допустимо, виявлена вада, її усунення це задача <sub>211</sub>

(рис. 2). Необхідно з'ясувати причину її появи, розглянути більш загальні задачі:  $z_{21}$ ,  $z_2$ . Аналіз однієї з більш загальних задач, наприклад  $z_2$ , розкриває інші спеціальні задачі і шляхи рішення проблеми, наприклад, такий "обхідний" шлях:  $z_2 \rightarrow z_{22} \rightarrow z_{222} \rightarrow z_{2221}$ . Причому цей шлях є "обхідним" стосовно вихідної (паралельної) задачі  $z_{221}$ , але "прямим" стосовно більш загальної  $z_2$ .

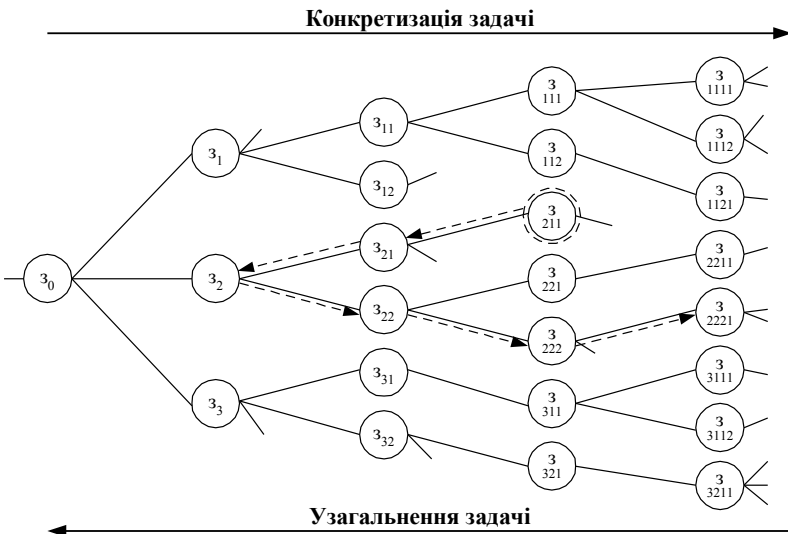


Рисунок 2 – Система науково-технічних задач

Для того щоб представити систему технічних задач, необхідно, по-перше, "угледіти" структуру самої технічної системи і надсистеми, а також їхній технічний стан (можливості); по-друге, система своїх (споживачів) потреб і бажань; по-третє, зіставити ці дві системи і сформулювати технічну ваду і задачу.

При рішенні "прямих" і більш спеціальних задач зручно користуватися методом виявлення причин технічних вад і побудови логічних ланцюгів причинно-наслідкових зв'язків вад з їхніми причинами. Метод, по суті справи, звичайний інженерний аналіз, при якому, поряд з логічними умоглядними дослідженнями системи, можуть проводитися більш глибокі, спеціальні експерименти і теоретичні дослідження. Для цього причина вади

сама представляється вадю, у якої є одна або кілька причин, і т.д. Якщо в процесі такого аналізу ми потрапляємо в ситуацію, коли не можемо назвати причину вади, механізм її появи, то ця технічна задача перетворюється в наукову, ціль якої - одержання нових знань про об'єкт дослідження.

У принципі кожна з ланок системи (див. рис. 2) може бути узята як відправний пункт при рішенні технічної задачі, але важко назвати який-небудь однозначний критерій вибору. Ним може бути швидкість і легкість впровадження, ресурси часу і сил, можлива економія, поліпшення безпеки праці чи інш.

Можна вибрати у якості задачі усунення першопричини виявленої вади або елемент системи, з яким пов'язано найбільша кількісна зміна вади, але в кожному разі такому вибору передуює докладний аналіз.

### **2.3. Аналіз технічної задачі**

За умовами технічної задачі розглядають систему, що володіє вадами і складається з елементів  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_n$  і якій притаманні вади. Елементи пов'язані між собою, і кожен елемент виконує ту або іншу функцію, що у якійсь мірі визначають основну функцію, для виконання якої система призначена. На даному етапі проектування необхідно провести дослідження технічної системи, установити структуру, а також параметри, що характеризують її роботу.

Для цього варто скласти список основних елементів технічної системи, без яких принципово неможливо її функціонування. Перелічити інші її елементи, розташували їх у порядку функціональної значимості для існування і функціонування системи, скласти матрицю зв'язків всіх елементів.

Важливо визначити головну функцію (призначення) системи, з'ясувати, які основні і допоміжні параметри можуть якісно і кількісно характеризувати її роботу, які фактори впливають на параметри системи і у чому полягає механізм їхнього впливу. Таким чином, на цьому етапі необхідно з'ясувати основний принцип і механізм дії досліджуваної системи. Крім того, вивчається науково-технічна література, присвячена дослідженню технічної системи, а також можливе додаткове проведення відповідних наукових досліджень.

Основна мета - одержати (математичну і/або фізичну) адекватну модель об'єкта. Всі наступні дослідження і перетворення в процесі рішення задачі належать до модельних експериментів.

Похідною від отриманої моделі системи є модель технічної вади. Необхідно з'ясувати, який параметр технічної системи може якісно і кількісно характеризувати її, які причини цієї вади, які елементи системи пов'язані з його появою і зміною, варто також установити, які фактори, що діють на систему, і параметри, що визначають її роботу, впливають на величину параметра, що характеризує технічну ваду. Рекомендується скласти таблицю зв'язків елементів, факторів і параметрів технічної системи з вагою.

Після побудови моделі технічної системи (і моделі, що впливає з технічної вади) треба спробувати вирішити задачу шляхом стандартних перетворень (доцільно використовувати фонд "стандартів" на рішення технічних задач [4], представлений в розд. 2.4).

Якщо інженерним або конструкторським шляхом технічну задачу в результаті таких спроб не вирішено, необхідний її подальший більш глибокий аналіз із переведенням у клас науково-технічних задач.

На цьому етапі важливо також з'ясувати можливості зміни технічної системи і межі таких змін. Для цього використовується метод аналізу властивостей.

Розглянемо два предмети: скляну склянку і лінзу. Якщо проаналізувати сукупність властивостей, що характеризують обидва ці об'єкти, то зрештою виявиться, що різниця між ними може бути лише у формі, масі і складі скла.

Або візьмемо два однакових залізних стрижні і один з них намагніtimo, перетворивши в постійний магніт. Різниця між цими об'єктами буде в значеннях тільки однієї властивості.

Інженер може описати будь-який матеріальний об'єкт або явище декількома сотнями властивостей. Але для багатьох об'єктів у певній області техніки список властивостей, що змінюються, значення яких характеризують ці об'єкти, може бути (у спрощеному варіанті) представлений лише декількома десятками.

У принципі будь-який об'єкт можна розглядати як певну безліч властивостей, кожне з яких приймає в конкретному випадку визначене значення. Геометричні, кінематичні, динамічні, фізико-



хімічні, тепло- і електротехнічні, оптичні і інші властивості характеризують будь-який об'єкт. Наприклад, така властивість, як швидкість переміщення, може описувати стан будь-якого об'єкту, у тому числі автомобіля, що рухається, і нерухомої будівлі. Але значення його будуть різні для цих об'єктів в одному випадку швидкість дорівнює 60 км/година, а в іншому - нулю.

Якщо ми візьмемо який-небудь елемент системи і визначимо значення кожної властивості із загального списку властивостей матеріальних об'єктів, то в такий спосіб ми опишемо цей елемент.

Розглянемо опис технічної системи в матричній формі [30]. Матриця властивостей будується в такий спосіб: по вертикалі розташовується їхній список, по горизонталі - список елементів технічної системи, а на перетинанні рядків і стовпців (в осередках матриці) - значення властивостей (параметрів) елементів.

Наступний крок - визначення потенційних змін властивостей елементів системи. Підхід, покладений в основу методу аналізу властивостей, припускає широкі можливості зміни значень багатьох властивостей у кожному об'єкті. Але завжди є властивості, у яких значення міняються в досить вузьких межах або практично не змінюються. Це в першу чергу ті, що визначають поняття про об'єкт. Наприклад, склянку визначає в основному форма, співвідношення розмірів, тобто конкретний інтервал значень деяких геометричних властивостей (параметрів), завдяки яким він стає склянкою. Лінзу ж визначають не тільки значення геометричних параметрів, але і оптичні властивості матеріалу.

Для того щоб з'ясувати, у чому й наскільки варто міняти нашу систему, потрібно проаналізувати й оцінити можливий інтервал зміни значення кожної властивості. Така оцінка може відбуватися за допомогою балів по певній шкалі. Наприклад, в одному з найпростіших випадків це трибальна шкала: якщо значення властивості міняються в широких межах, ставиться "+", у вузьких межах "0", а якщо їх змінити не можна "-".

Характеристика потенційних змін властивостей елементів системи може бути представлена в матричній формі. Ця матриця так само, як і описана раніше, містить по вертикалі список властивостей, а по горизонталі - список елементів технічної системи. В матриці містяться оцінки можливості зміни значень тієї або іншої властивості (у ній передбачено і допоміжний стовпчик

для елемента "x", у якій надалі при пошуку ідеї рішення будуть закодовані нові властивості й функції системи).

Згадані дві матриці можна сполучити в одну, заклавши одночасно й існуюче значення властивості елемента, і оцінку можливостей його зміни.

Крім того, аналіз властивостей елементів сприяє тренуванню й розвитку уяви, зниженню дії психологічної інерції. Установлюючи межі зміни значень властивостей, ми подумки уявляємо елемент при найбільшому й найменшому значеннях властивості.

Такий підхід зручний тим, що він дозволяє відійти від уявлень про конкретний об'єкт на загальний для всіх, що належать даному класу об'єктів. При цьому будь-який об'єкт описується тим самим набором параметрів, а кожен окремо взятий параметр уже не характеризує сам об'єкт, тому що описує тільки одну властивість із безлічі інших і при цьому значення даної властивості може бути однаковим для зовсім різних об'єктів. Таким чином, у зовсім різних предметах й явищах можна побачити щось загальне, провести між ними аналогію, підставою для якої є збіг або: близькість значень окремих властивостей цих, у цілому різних, об'єктів.

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

Технічна задача, не вирішена за допомогою традиційних, стандартних інженерно-конструкторських прийомів, підлягає переводу в клас науково-технічних (винахідницьких) задач і наступній обробці: формулюванню умов задачі й пошуку ідеї її вирішення.

Умови задачі повинні складатися із трьох елементів: моделей технічної системи і її вади, ідеального кінцевого результату й технічного протиріччя, виявленого в результаті порівняння цих двох елементів.

Значення формулювання ідеального кінцевого результату полягає в тім, щоб одержати орієнтир для руху до технічних рішень високого рівня. Ідеальне вирішення - найбільш сильне із всіх мислимих і немислимих рішень даної задачі.

Існують наступні принципи досягнення ідеальності технічного виробу (системи) [14]:

- необхідно одержувати корисний результат від дії або засобу

без самої дії або засобу ("одержати даром, безкоштовно");

- у кожний момент часу й у кожній точці простору у виробі повинні бути тільки ті властивості й взаємодії, які необхідні для одержання корисного результату ("нічого зайвого");

- необхідно максимально використовувати наявні властивості й взаємодії елементів системи і її оточення, усувати втрати й відходи ("із зайвого - максимальну користь");

- необхідно доводити до мінімуму витрати часу на одержання корисного результату ("одержати відразу, миттєво").

Перші три принципи ідеальності являють собою поетапний відступ від абсолютно ідеальної системи до реальності. Реалізація першого принципу можлива за рахунок використання виходів сусідніх систем й оточення (найчастіше некорисних).

При вирішенні науково-технічної задачі необхідно максимально наблизитися до ідеального кінцевого результату, різко поліпшити якісь показники, не погіршивши інші. Ідеальність вирішення досягається тим, що потрібний ефект досягається "даром", без використання яких би те не було засобів [4]. Наприклад, ідеальний корабель: корабля немає, а вантаж самостійно транспортується. Такі рішення існують - це плоти, цілком складені з вантажу. Таким рішенням є змієподібний корабель (англ. пат. № 1403191): невелика моторна секція (голова) тягне довгий гнучкий состав з контейнерів (тулуб).

Від формулювання ідеального кінцевого результату залежить вибір подальшого напрямку пошуків, і отже, це один із творчих етапів, що визначають успіх усього рішення.

Формулювання ідеального результату містить бажані властивості, функції, дії (результату) за яким-небудь елементом. Можна шляхом визначення елемента, що найбільшою мірою піддається зміні, і приписуючи йому бажаний результат, - таке формулювання ідеального результату значно звужує напрямок подальшого пошуку й обмежує його рядом конструктивних змін.

Якщо у ролі такого елемента завжди брати "зовнішнє середовище", то поле пошуку розширюється, і серед варіантів рішення задачі залишаються не тільки конструктивні, але й технологічні рішення, пов'язані зі зміною значення одного із властивостей (параметрів) елементів системи. Необхідно мати у виді, що можливості зміни значень властивостей "зовнішнього середовища" безмежні, і у

зв'язку із цим вона може здобувати форму будь-якого елемента, предмета або явища.

Технічні протиріччя умовно поділяють по ступеню конкретизації на технічні й фізичні.

Технічні протиріччя можна представити у вигляді: "якщо поліпшувати параметр  $A$  відомим шляхом, тоді неприпустимо погіршується параметр  $B$ " або "елемент  $A$  повинен виконувати дію  $B$  (мати які-небудь необхідні властивості), але він не може його виконати (не має необхідні властивості)". Наприклад, "якщо збільшити міцність конструкції, то неприпустимо зросте її вага" або "трубопровід повинен сам регулювати свій переріз, але його внутрішня частина не може звужуватися й розширюватися".

Фізичні протиріччя можна представити у вигляді: "елемент  $A$  повинен виконувати дію  $B_1$  (мати якусь властивість) для того, щоб здійснювалося  $C_1$ , але елемент  $A$  також повинен виконувати дію  $B_2$  (мати протилежну властивість) для того, щоб здійснювалося  $C_2$ " або "елемент  $A$  (властивість елемента) повинен (повинне) бути й не повинен (не повинне) бути". Наприклад, "елемент повинен бути провідником для того, щоб пропускати електричний струм у напрямку 1, і повинен бути діелектриком для того, щоб не пропускати електричний струм у напрямку 2" або "електропровідність повинна бути і її не повинне бути".

Після цього здійснюємо пошук ідеї рішення (принципу) дії, що дозволяє дозволити (перебороти) виявлене протиріччя.

На рівні технічного протиріччя пошук ідеї рішення може, зокрема, проводитися із застосуванням типових прийомів подолання протиріччя [3, 4] і фонду евристичних прийомів [18]:

1) *Принцип дроблення*. Розділити об'єкт на частини, виконати розбірним, збільшити ступінь дроблення.

2) *Принцип винесення*. Відокремити від об'єкта частину, що заважає (властивість) або виділити єдино потрібну.

3) *Принцип місцевої якості*. Перейти від однорідної структури об'єкту (процесу) до неоднорідного. Різні частини об'єкта повинні мати різні функції й характеристики, що найбільш відповідають їхній роботі.

4) *Принцип асиметрії*. Перейти від симетричної форми до асиметричної.

5) *Принцип об'єднання*. З'єднати (об'єднати) у просторі або

часі однорідні або суміжні операції (об'єкти).

6) *Принцип універсальності*. Об'єкт виконує функції інших об'єктів (тих, у яких тепер немає потреби).

7) *Принцип "матрьошки"*. Один об'єкт розміщений усередині іншого, проходить крізь порожнину в іншому об'єкті, інший - усередині третього й т.д.

8) *Принцип антиваги*. Компенсувати вагу об'єкту сполученням з іншими об'єктами, що володіють підйомною силою, або взаємодією із середовищем (за рахунок аеро-, гідродинамічних й інших сил).

9) *Принцип попередньої напруги*. Заздалегідь додати об'єкту деформації (напруги), протилежні небажаним.

10) *Принцип попереднього виконання*. Заздалегідь виконати необхідну зміну об'єкту (повністю або частково), розставити об'єкти так, щоб вони могли вступити в дію з мінімальними витратами часу на їхню доставку.

11) *Принцип "заздалегідь підкладеної подушки"*. Компенсувати невисоку надійність об'єкту підготовленими аварійними засобами.

12) *Принцип рівнопотенційності*. Змінити умови роботи так, щоб не доводилося піднімати або опускати об'єкт.

13) *Принцип "навпаки"*. Замість дії, що обумовлена, здійснити зворотну дію; зробити частину, що рухається, нерухомою, а нерухому - що рухається; перевернути об'єкт.

14) *Принцип сфероїдальності*. Перейти від прямолінійних частин об'єкту до криволінійних, від плоских поверхонь до сферичній; використати ролики, кульки, спіралі.

15) *Принцип динамічності*. Характеристики об'єкту повинні мінятися так, щоб бути оптимальними на кожному етапі роботи; розділити об'єкт на відносно рухомі частини; нерухомий об'єкт зробити рухливим.

16) *Принцип часткового або надлишкового рішення*. Якщо важко одержати 100% необхідної дії, треба одержати ледве менше або ледве більше.

17) *Принцип переходу в інший вимір*. Збільшити число ступенів свободи об'єкту перейти від руху по лінії, в одному вимірі, до руху в декількох вимірах, по площині, у просторі; застосувати багатопверхове компонування замість одноповерхового

використати зворотний бік поверхні.

18) *Принцип використання механічних коливань*. Привести об'єкт у коливальний рух; змінити частоту; використати резонансні й ультразвукові частоти.

19) *Принцип періодичної дії*. Перейти від безперервної дії до періодичної, змінити періодичність.

20) *Принцип безперервності корисної дії*. Вести роботу безупинно, усунути неробочі й проміжні ходи; перейти від зворотно-поступального до обертового руху.

21) *Принцип "проскакування"*. Перебороти окремі, у тому числі шкідливі й небезпечні стадії процесу на підвищеній швидкості.

22) *Принцип "звернути шкоду на користь"*. Використати шкідливі фактори для одержання позитивного ефекту; підсилити шкідливий фактор настільки, щоб він перестав бути таким; компенсувати один шкідливий фактор іншим.

23) *Принцип зворотного зв'язку*. Ввести зворотний зв'язок, якщо він вже є - змінити його.

24) *Принцип "посередника"*. Використати проміжний об'єкт-переносник.

25) *Принцип самообслуговування*. Об'єкт повинен сам себе обслуговувати, виконувати допоміжні й ремонтні роботи, використати відходи речовини, енергії.

26) *Принцип копіювання*. Замість недоступного, складного, дорогого, незручного або тендітного об'єкту використати його спрощені й дешеві копії, у тому числі оптичні видимі інфрачервоні й ультрафіолетові, у зміненому масштабі й т.д.

27) *Принцип заміни дорогої довговічності на дешеву недовговічність*. Замінити дорогий об'єкт набором дешевих, поступившись при цьому деякими якостями (наприклад, довговічністю).

28) *Принцип заміни механічної схеми*. Замінити механічну схему електричною, оптичною, тепловою, акустичною або "запаховою"; використати електричні, магнітні й електромагнітні поля для взаємодії з об'єктом; перейти від стаціонарних полів до тих, що змінюються.

29) *Принцип використання пневмо- і гідроконструкцій*. Замість твердих частин об'єкту використати газоподібну й рідкі:

надувні й гідронаповнювані, повітряну подушку, гідростатичні й гідрореактивні.

30) *Принцип використання гнучких оболонок і тонких плівок.* Замість об'ємних конструкцій використати гнучкі оболонки й тонкі плівки, ізолювати з їхньою допомогою об'єкт від зовнішнього середовища.

31) *Принцип використання пористих матеріалів.* Зробити об'єкт або його частини пористими, заповнити пори якою-небудь речовиною.

32) *Принцип зміни кольору.* Змінити колір або ступінь прозорості об'єкта або зовнішнього середовища, використати барвні добавки, мічені атоми.

33) *Принцип однорідності.* Об'єкти, взаємодіючі з даним, повинні бути зроблені з того ж матеріалу (або близьким до нього по властивостях).

34) *Принцип відходів або регенерації частин.* Частина об'єкту, що виконала своє призначення або, що стала непотрібною повинна бути відкинута (розчинена, випарувана й т.д.) або видозмінена; частини, що йдуть до витрат, повинні відновлюватися в ході роботи.

35) *Принцип зміни фізико-хімічних параметрів об'єкту.* Змінити агрегатний стан об'єкту, хімічний склад; концентрацію або консистенцію, ступінь рідини, температуру, об'єм.

36) *Принцип використання фазових переходів.* Використати зміну параметрів, що відбувається при фазових переходах: зміна обсягу, виділення або поглинання тепла й т.д.

37) *Принцип використання термічного розширення.* Використати термічне розширення й стиск матеріалів, застосувати матеріали з різними коефіцієнтами термічного розширення.

38) *Принцип використання сильних окислювачів.* Уводити збагачене повітря або кисень, вплинути на них іонізуючими випромінюваннями, застосовувати озонований кисень.

39) *Принцип зміни ступеня інертності.* Замінити звичайне середовище нейтральним, увести в об'єкт нейтральні частини й добавки, провадити процес у вакуумі.

40) *Принцип використання композиційних матеріалів.* Перейти від однорідних матеріалів до композиційних.

На рівні фізичного протиріччя, пошук ідеї рішення може,

зокрема, проводиться із застосуванням фондів і показчиків фізичних, фізико-хімічних й інших ефектів й явищ [4, 18].

Наведемо, можливі варіанти застосування фізичних і фізико-хімічних ефектів й явищ при рішенні завдань проектування технічних виробів (систем):

- зміну температури (зниження, підвищення або стабілізація);
- індикація положення й переміщення об'єкту;
- керування рухом рідини й газу, потоками аерозолів;
- перемішування сумішей, утворення розчинів;
- поділ сумішей; стабілізація положення об'єкту;
- силовий вплив, регулювання сил;
- створення більших тисків;
- зміна тертя, руйнування об'єкту,
- акумулювання механічної й теплової енергії;
- передача енергії (механічної, теплової, променистої і електричної);
- установа взаємодії між рухливим (мінливим) і нерухомим (немінливим) об'єктами;
- вимір розмірів (властивостей) об'єкту; зміна розмірів (властивостей) об'єктів;
- контроль стану або зміна властивостей поверхні (або об'ємних властивостей) об'єкту;
- створення заданої структури; стабілізація структури об'єкту;
- індикація електричних, магнітних полів і випромінювання (світла) і керування їхніми параметрами;
- ініціювання й інтенсифікація хімічних перетворень.

На обох рівнях протиріччя формулювання умов науково-технічного завдання можуть застосовуватися: параметричний метод [12], аналоги з різних областей техніки й фонд матеріально-польових перетворень [4].

При конкретизації ідеї рішення (переході від концепції до принципу) обов'язково враховується взаємозв'язок багатьох властивостей елементів системи й взаємозумовленість їхніх значень. Наприклад, вага залежить від маси, маса - від розмірів, тиск - від температури й т.д. Ці взаємозв'язки можуть бути виявлені при аналізі властивостей, а також шляхом складання матриці взаємозв'язку властивостей елементів, аналогічній матриці зв'язків елементів системи. Якщо ж ідея рішення не знайдена, то необхідно



повернутися до одного з попередніх етапів. Вибрати іншу технічну задачу й всі процедури повторити з нею: ще раз проаналізувати, глибше вивчити технічну й фізичну сутність системи; змінити умови науково-технічної задачі.

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

Система, обтяжена недоліком, який необхідно усунути її перетвореннями, є прототипом нового технічного рішення. Ідея, одержана в результаті попереднього аналізу технічного завдання, - початок нової технічної системи. Вона з'являється в надрах старої й породжена її недоліками. Однак технічної системи ще немає - її потрібно синтезувати, виконати перетворення прототипу, відповідно до ідеї рішення.

Як правило, ідея рішення - це формулювання якого-небудь фізичного принципу, використовованого в передбачуваному новому об'єкті, сукупність яких-небудь дій, функцій. Її можна представити як систему функцій елементів майбутнього технічного об'єкту (носіїв цих функцій треба визначити й скласти з них нову технічну систему).

Ідею рішення, як й елементи технічної системи, описують і сукупністю властивостей, для цього досить указати тільки ті властивості середовища або яких-небудь елементів, які ми використовуємо, змінюючи їхнє значення, управляючи ними. При синтезі технічного рішення визначаються матеріальні носії тих значень властивостей і функції, які відповідають ідеї. Природно, витрати на реалізацію ідеї повинні бути мінімальні й рішення повинне бути витонченим, тому необхідно в першу чергу спробувати закріпити нові функції за вже наявними елементами системи, змінивши значення деяких їхніх властивостей.

Не виключено, що існуючі елементи не можна пристосувати до виконання нових функцій. Тоді потрібно вводити додатковий елемент (або елементи). Після введення варто з'ясувати його можливості й здатність виконувати деякі функції інших елементів технічної системи - перестановка функцій іноді дозволяє істотно спростити технічне виконання елементів або навіть відмовитися від окремих з них.

Ідею рішення можна відобразити й у матрицях аналізу властивостей і потенційних змін властивостей елементів технічної

системи: у них передбачається додатковий стовпчик для допоміжного елемента - середовища. У ній відзначають властивості середовища, необхідні для здійснення ідеї рішення, і їхнього значення. Потім варто переглянути можливості зміни цих властивостей інших елементів технічної системи. При збігу значень властивостей якого-небудь елемента й середовища їх закріплюють за цим елементом технічної системи. Якщо ж у системі немає елементів, які могли б взяти на себе властивості середовища, то вводять додатковий елемент. Таким чином, застосовують метод аналізу властивостей (матриць властивостей) на етапі синтезу нової технічної системи, що дозволяє формалізувати процедури даного етапу.

При цьому бажано елементи технічної системи попередньо класифікувати на дві групи: вироби й інструменти. Вироби, як правило, елементи, значення властивостей яких змінювати не можна (виходить, вони в меншому ступені здатні виконувати функції середовища). Інструменти більшою мірою піддаються змінам або пристосуванню. Коли ж носієм властивостей середовища є виріб, іноді ці властивості повинні бути індукованим, створеним відповідним впливом на виріб інших елементів системи - інструментів.

Після визначення структури нової технічної системи починають її конструктивно-технічне доведення до конкретного рішення, здійсненого на практиці. Цей етап містить всі процедури, характерні для процесу проектування будь-якого технічного об'єкту. При недостатній інформації для проектування можуть бути проведені додаткові експериментальні й теоретичні дослідження, створені діючі фізичні моделі й т. д.

Коли рішення доопрацьовано до форми конкретного об'єкту, необхідно з'ясувати його технічні, техніко-економічні та інші показники, співставити їх з аналогічними показниками прототипу й визначити ефективність рішення.

Заключний етап процесу рішення технічної задачі, що представляє собою одночасно вихідний етап нового процесу рішення, - це виявлення недоліків створеної технічної системи. Він замикає один цикл і починає новий, пов'язаний з удосконаленням отриманого технічного рішення.

**Питання для самостійного контролю.**

1. Опишіть схему рішення технічної задачі.
2. Перелічіть етапи рішення проектних задач й їхнє методологічне забезпечення.
3. Яка роль аналізу технічної задачі?
4. Опишіть метод аналізу властивостей. Які можливості пропонує даний метод при аналізі технічної задачі?
5. Дайте формулювання ідеального кінцевого результату?
6. Перелічіть обов'язкові елементи умов завдання.
7. Приведіть приклади технічних і фізичних протиріч.
8. Типові прийоми подолання технічного протиріччя.
9. Які використовують фізичні й фізико-хімічні ефекти і явища при пошуку технічного рішення для подолання фізичного протиріччя?
10. Що таке "ідея рішення"?
11. Чим відрізняються елементи технічної системи - вироби й інструменти?

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ПОШУКУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

У даному розділі дано загальне уявлення про методи пошуку нових науково-технічних рішень й активізації творчості при проектуванні технічних виробів (систем). Більш докладно описано найпоширеніші методи, такі як методи асоціації й контрольних питань, мозкового штурму (атаки), синектика, морфологічний аналіз.

#### 3.1. Загальні поняття про методи пошуку

При створенні нових технічних виробів (систем) завжди виникають проблеми пошуку (винаходу) нових, більш ефективних конструкторсько-технологічних рішень, і насамперед таких, які переважають рівень існуючих. Ця обставина вимагає від наукових співробітників та інженерів обов'язкового оволодіння інтенсивною технологією інженерного творення, розкриття їх творчих нахилів і здібностей.

На сьогодні розроблено більше 100 методів активізації наукової та інженерної творчості, які можна умовно розділити на:

1. *Евристичні методи* технічної творчості, за допомогою яких здійснюють пошук нових технічних рішень без використання комп'ютерних технологій.

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

При більш детальній класифікації методів інженерного творення їх поділяють на 4 групи:

1. *Системні* (комбінаторні або гібридні), які направлені на послідовний перебір усіх можливих варіантів рішень. В основу цих методів покладені принципи аналізу, будови і властивостей технічних виробів (систем).

2. *Асоціативні* (психологічна активізація творчості), які передбачають активізацію генерування ідей шляхом психологічного подолання інерції мислення і представляють безсистемний пошук рішення задач.

3. *Програмні* (алгоритмічні), які забезпечують більш або менш цілеспрямований рух до вирішення задачі шляхом виявлення

технічних і фізичних протиріч у відомих технічних виробках і їх наступне подолання.

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

У табл. 2 наведені 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 відпрацьовування конструкторських рішень	Ю. Соболев
13	Алгоритм рішення винахідницьких завдань	Г. Альтшулер
14	Метод спрямованого мислення	Н. Середа
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"	Колект. авт.
43	Інтегральний метод "Метра"	І. Бувен й ін.
	<i>Чехія</i>	
44	Метод комплексного рішення проблем	С. Віт

Далі розглянемо деякі з найпоширеніших методів активізації пошуку рішень при проектуванні нових технічних виробів (систем).

### 3.2. Асоціативні методи пошуку

Асоціативні методи активізації творчого мислення ґрунтуються на застосуванні у творчому процесі семантичних властивостей понять шляхом використання аналогії їх вторинних змістових відтінків. Основними джерелами для генерування нових ідей служать асоціації, метафори й випадково обрані поняття [8, 9].

До асоціативних методів відносяться (багато в чому аналогічні): метод каталогу, метод фокальних об'єктів, метод гірлянд випадків й асоціацій [9, 27].

Між двома зовсім різними, незв'язаними поняттями (словами) можна здійснити логічний зв'язок, установити асоціативний перехід у чотири-п'ять етапів [16]. Візьмемо два різних поняття - "деревина" й "м'яч". Здійснимо асоціативний перехід: "деревина" - "ліс", "ліс" - "поле", "поле" - "футбольне", "футбольний" - "м'яч". Або такі два поняття, як "небо" й "чай": "небо" - "земля", "земля" - "вода", "вода" - "пити", "пити" - "чай".

Встановлено, що число прямих асоціативних зв'язків будь-якого поняття (слова) у середньому біля десяти. Один асоціативний крок дає можливість вибору з 10 слів, другий - з  $10^2$ , третій - з  $10^3$ , четвертий - з  $10^4$ . Таким чином, кожен крок на порядок збільшує число зв'язків даного поняття з іншими поняттями по тим або іншим ознакам, що істотно розширює можливості вибору ідей рішення.

Винахідництво пов'язане з пошуком віддалених аналогів, переносом знань із однієї області в іншу, інтерпретацією нового за допомогою відомих понять, тому в ньому важко обійтися без обхідних слів, переносного значення, метафоричних виразів, які викликають нові асоціації. Останні розділяють за подобою, контрастом, суміжністю й змістом. Асоціації за подобою - це матеріал для евристичної аналогії; за контрастом - для евристичної інверсії; за суміжністю - для перетворення в просторі й часі; за змістом - для семантичної інтерпретації проблемної ситуації, встановлення причинно-наслідкових зв'язків між технічним об'єктом, його елементами, людиною, середовищем і т.д.

Метафори можуть служити підказкою для знаходження нової ідеї. Але їхнє безпосереднє використання вимагає яскраво виражених здатностей до нешаблонного мислення. Для полегшення цього процесу беруть на озброєння прийом інтерпретації значення метафор у технічних термінах. Одночасно з метою розширення простору пошуку ідей і підвищення ступеня їхньої оригінальності використовують гірлянди метафор (асоціацій), тобто семантично взаємозалежні ланцюжки. Найчастіше застосовують два їхні різновиди: а) концентровані гірлянди (грона), що по-різному виражають те саме ключове

поняття; б) гірлянди послідовних метафор (асоціацій), при генеруванні яких попередня метафора є ключовим поняттям для утворення наступної.

Якщо взяти одне ключове слово "повітря", то гірлянда концентрованих метафор може бути такою: "повітря" - "невидиме середовище" (метафора-аналог) - "матеріальний дух" (метафора-катахреза) - "що сокирою не перерубаш?" (метафора-загадка). Інтерпретацією гірлянди служать поняття: вакуум, спирт, пневмотранспорт, промінь, тінь, вітер, електрика й т. д. Наведені поняття є окремими аналогами ключового слова й використовуються для його аналізу в контексті задачі з метою знаходження ідеї рішення.

Застосування послідовних гірлянд метафор дає ще більш віддалені аналогічні (або протилежні) поняття. Перевагою метафоричного мислення є його високий рівень оригінальності. Генерування метафор вимагає набуття навичок, але легко піддається формалізації.

Якщо на об'єкт, що удосконалюється, перенести ознаки інших, випадково обраних об'єктів, то різко зросте число несподіваних варіантів рішення. Ця ідея послужила основою методу активізації творчості, запропонованого в 1926 р. професором Берлінського університету Ф. Кунце (метод каталогу) і вдосконаленого в 50-х роках американським винахідником Ч. Вайтингом (метод фокальних об'єктів).

Метод фокальних об'єктів дає гарні результати при пошуку нових модифікацій відомих способів і пристроїв. Сутність методу у перенесенні ознак випадково обраних об'єктів на об'єкт, що удосконалюється.

Застосовують метод фокальних об'єктів у наступному порядку:

- вибір фокального об'єкту (наприклад, годинник);
- вибір трьох-чотирьох випадкових об'єктів (їх беруть навмання зі словника, каталогу, технічного журналу й т. д. Наприклад, кіно, змія, каса, полюс);
- складання списків ознак випадкових об'єктів (наприклад, кіно: широкоекранне, звукове, кольорове, об'ємне й т. д.);
- генерування ідей шляхом приєднання до фокального об'єкта ознак випадкових об'єктів (наприклад, широкоекранний годинник,



звуковий годинник, об'ємний годинник і т. д.);

- розвиток отриманих сполучень шляхом вільних асоціацій (наприклад, широкоекранний годинник: замість вузького циферблата взятий широкий; може бути вузький циферблат, що іноді розтягується в широкий, проектується кудись... і т. д.);

- оцінка отриманих ідей і відбір корисних рішень.

Подальшим розвитком методу фокальних об'єктів є метод гірлянд випадків й асоціацій, розроблений Г.Я. Бушем [9]. Він допомагає знайти велику кількість підказок для нових ідей шляхом утворення асоціацій.

### 3.3. Методи контрольних питань

Метод контрольних питань застосовується для психологічної активізації творчого процесу. Ціль його - за допомогою навідних запитань підвести до рішення задачі. Списки таких питань пропонувалися різними авторами, починаючи з 20-х років ХХ сторіччя.

Метод може застосовуватися або у формі монологу співробітника (інженера, аспіранта), зверненого до самого себе, або діалогу, наприклад, у вигляді питань, що задаються керівником мозкового штурму членам групи генераторів ідей. Суть методу полягає в тому, що співробітник відповідає на питання за визначеним списком, і у зв'язку з ними розглядає свою задачу. Широко поширені універсальні списки запитань, складені А. Осборном, Е. Раудзенпом, Т. Ейлоартом, Д. Пірсоном й ін. Вони складаються з різної кількості питань. За кордоном частіше користуються списком запитань, розробленим А. Осборном, що містить 9 груп питань.

Список контрольних питань по А. Осборну.

1) Яке нове застосування технічного об'єкту можна запропонувати? Чи можливі нові способи застосування? Як модифікувати відомі способи застосування?

2) Чи можливо вирішення задачі шляхом пристосування, спрощення, скорочення? Що нагадує даний технічний об'єкт? Чи викликає аналогія нову ідею? Чи є в минулому аналогічні проблемні ситуації, які можна використати? Що можна скопіювати? Який технічний об'єкт потрібно випереджати?

3) Які модифікації технічного об'єкту можливі? Чи можлива

модифікація шляхом обертання, вигину, скручування, повороту? Які зміни призначення (функції), кольору, руху, аромату, форми, обрисів можливі? Інші можливі зміни?

4) Що можна збільшити в технічному об'єкті? Що можна приєднати? Чи можливо збільшення часу служби, впливу? Збільшити частоту, розміри, міцність? Підвищити якість? Приєднати новий інгредієнт? Дублювати? Чи можлива мультиплікація робочих елементів або всього об'єкту? Чи можливо перебільшення, гіперболізація елементів або всього об'єкту?

5) Що можна в технічному об'єкті зменшити? Що можна замінити? Чи можна що-небудь ущільнити, стиснути, згустити, конденсувати, застосувати спосіб мініатюризації, укоротити, звузити, відокремити, роздрібнити?

6) Що можна в технічному об'єкті замінити? Що, скільки замінити й із чим? Інший інгредієнт? Інший матеріал? Інший процес? Інше джерело енергії? Інше розташування? Інший колір, звук, освітлення?

7) Що можна перетворити в технічному об'єкті? Які компоненти можна взаємно замінити? Змінити модель? Змінити розбивку, розмітку, планування? Змінити послідовність операцій? Транспонувати причину й ефект? Змінити швидкість або темп? Змінити режим?

8) Що можна в технічному об'єкті перевернути навпаки? Транспонувати позитивне й негативне. Чи не можна обміняти місцями протилежно розміщені елементи? Повернути їх задом наперед? Перевернути низом нагору? Поміняти ролями? Перевернути затиски?

9) Які нові комбінації елементів технічного об'єкту можливі? Чи можна створити суміш, сплав, нові асортименти, гарнітур? Комбінувати секції, вузли, блоки, агрегати? Комбінувати цілі? Комбінувати привабливі ознаки? Комбінувати ідеї?

Одним із кращих можна вважати список контрольних питань, складений англійським винахідником Т. Ейлоартом.

1) Перелічить всі якості й визначення передбачуваного винаходу. Змінити їх.

2) Точно сформулювати задачу. Спробувати нові формулювання. Визначити другорядні й аналогічні задачі. Виділити головні.

3) Перелічити недоліки наявних рішень, їхні основні принципи, нові припущення.

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

5) Побудувати математичну, гідравлічну, електронну, механічну й іншу моделі (вони точніше виражають ідею, чим аналогії).

6) Спробувати різні види матеріалів й енергії: газ, рідину, тверде тіло, гель, піну, пасту й ін.; тепло, магнітну енергію, світло, силу удару й т. д.; різні довжини хвиль, поверхневі властивості й т. п., перехідні стани - замерзання, конденсація, перехід через точку Кюрі й т. д.; ефекти Джоуля-Томпсона, Фарадея й ін.

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

8) Довідатися думку деяких зовсім необізнаних у даній справі людей.

9) Влаштувати сумбурне групове обговорення, вислуховуючи всі ідеї без критики (наприклад, використовуючи такі популярні методи психологічної активізації колективної творчої діяльності - "мозковий штурм" [7] і "синектика" [9]).

10) Спробувати "національні" рішення: хитре шотландське, всеосяжне німецьке, марнотратне американське, складне китайське й т. д.

11) Дома й на роботі, весь час, думати над рішенням проблеми.

12) Прогулюватись серед стимулюючого оточення (смітник металобрухту, технічні музеї, магазини дешевих речей), роздивлятися журнали, комікси.

13) Створити таблицю цін, величин, переміщень, типів матеріалів і т. д. різних рішень проблеми або її частин, шукати проблеми в рішеннях або нові комбінації.

14) Визначити ідеальне рішення, розробляти можливі.

15) Видозмінити рішення проблеми з погляду часу (скоріше або повільніше), розмірів, в'язкості й т. п.

16) В уяві залізи усередину механізму.

17) Визначити альтернативні проблеми й системи, які вилучають певну ланку з ланцюга й, таким чином, створюють щось зовсім інше, ведучи убік від потрібного рішення.

- 18) Чия це проблема? Чому його?
- 19) Хто придумав це першим? Історія питання. Які хибні тлумачення цієї проблеми мали місце?
- 20) Хто ще вирішив цю проблему? Чого він домігся?
- 21) Визначити загальноприйнятні граничні умови й причини, їхнього встановлення.

Існує також список питань Д. Пойа, що відрізняється тим, що питання тут становлять певну систему (в інших списках їх можна міняти місцями). Список Д. Пойа створювався переважно для рішення математичних задач, але може бути використаний і при рішенні технічних.

Найбільш універсальний запитальник Г.Я. Буша [7], який називають запитальником уявного експерименту винахідника. Він містить, наприклад, такі питання.

Як вирішити задачу, якщо не зважати на витрати, якщо від її рішення залежить життя людини, якщо технічний об'єкт буде використаний як іграшка, або якщо об'єкт є навчальним посібником, експонатом?

Чи не можна відкинуті в минулому принципи рішення використати зараз при сучасних технічних можливостях?

Чи можна пророчити результат рішення задачі через 10 – 15 років з урахуванням росту суспільних потреб?

Як виглядає перелік усіх основних недоліків відомих рішень задачі? Яким повинне бути рішення, якщо усунути їх?

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

Метод мозкового штурму (атаки) - один з найбільш популярних методів психологічної активізації колективної творчої діяльності, розроблений американським підприємцем А. Осборном в 1953 р. Він застосовується для одержання нових ідей у науці, техніці, адміністративній й торговельній діяльності.

Особливістю даного методу є те, що для усунення психологічних перешкод, спричинених острахом критики, А. Осборн запропонував розділити в часі процеси генерування ідей й їхньої критичної оцінки [7]. Найкращі результати метод дає при розгляді задач організаційного характеру (наприклад, знайти нове застосування виробленій продукції, знайти нову форму реклами й т. д.) і при рішенні щодо нескладних технічних задач.

Розрізняють методи прямого й зворотного мозкового штурму.

При прямому мозковому штурмі, умови задачі формулюються тільки в загальних поняттях, у якій повинні бути визначені два моменти: що необхідно одержати або мати, і що заважає одержанню бажаного.

При зворотному мозковому штурмі основне значення надають критиці. Задачу підбирають не загального характеру, а більш конкретну. Особливість методу полягає в розкритті протиріч, дефектів, недоліків й обмежень проєктованого виробу.

Тому при проєктуванні виробу вирішуються дві задачі:

- виявлення в існуючих виробих максимального числа недоліків;

- максимальне усунення цих недоліків у знову розроблювальному виробі.

Основні правила мозкового штурму.

1) Задачу послідовно вирішують дві групи людей по 3 - 15 чоловік у кожній.

Перша група тільки висуває різні ідеї - це група "генераторів ідей". У ній бажано мати людей, схильних до абстрагування, з бурхливою фантазією. Завдання "штурмується" протягом 20 - 40 хвилин. Друга група - "експерти" - по закінченні штурму виносить судження щодо цінності висунутих ідей. У її складі краще працюють люди з аналітичним, критичним складом розуму.

Як правило, група "генераторів ідей" складається із двох підгруп: постійне ядро групи й тимчасових членів. Ядро групи поступово відбирається при рішенні різних задач методом мозкового штурму. У ядро групи входять її керівник і співробітники, що легко й плідно генерують ідеї, а також добре знають правила і дотримують їх.

Тимчасові члени запрошуються залежно від характеру й змісту майбутньої задачі. У творчу групу ніколи не включають природжених скептиків й критиканів, а також тих чия присутність може в якійсь мірі заважати іншим, наприклад керівників і підлеглих. Тимчасові члени служать необхідним і гармонічним доповненням до ядра групи, що забезпечує виконання наступних рекомендацій: число фахівців з розв'язуваної задачі повинне бути не більше половини; до складу групи доцільно включати фахівців-

суміжників (конструктори, технологи, економісти, постачальники й т.д.), які забезпечать комплексний і всебічний розгляд задачі; до складу групи бажано включати жінок, які досить практично й оригінально мислять, стимулюють і підвищують дух змагання серед чоловіків; рекомендується включати "людей со сторони", що не мають ніякого відношення до задачі.

2) Основне завдання групи "генераторів ідей" - видати за відведений час якнайбільше ідей (у тому числі фантастичних, явно помилкових і жартівливих). Чим нереальніші ідеї, тим сильніше позначається їхня дія на наступному процесі їхньої генерації. Погані ідеї - це каталізatori, без них не буде гарних. При підведенні підсумків, що відбудеться пізніше, багато пропозицій виявляться марними. Однак сам процес повинен викликати бурхливий потік ідей, які впливають безупинно, доповнюючи й взаємно збагачуючи один одного. Колективний розум допомагає генерувати послідовність пропозицій. Регламент на кожен ідею - не більше двох хвилин. Всі вони висловлюються без доказів і записуються до протоколу.

3) При генерації ідей заборонено усяка критика, не тільки явна словесна, але й прихована - у вигляді скептичних посмішок, міміки, жестів і т.д. У ході штурму між учасниками повинні бути встановлені вільні й доброзичливі відносини. Треба, щоб ідея, висунута одним учасником штурму, підхоплювалася й розвивалася іншими.

4) Експертизу й відбір ідей після закінчення процесу генерування варто проводити дуже уважно. При їхній оцінці треба ретельно продумувати всі ідеї, навіть ті, які вважаються несерйозними, нереальними або абсурдними.

5) Процесом рішення задачі управляє керівник "штурму", що забезпечує дотримання всіх умов і правил.

Керівник повинен виконувати свої обов'язки без наказів і критики, направляти роботу в потрібне русло. Він задає різні питання, іноді щось підказує або уточнює, не допускаючи при цьому переривання бесіди. Крім того, йому потрібно стежити за тим, щоб висловлення ідей не відбувалося тільки в раціональному напрямку. У противному випадку керівник повинен сам висловити свідомо фантастичну ідею або оголосити "п'ятихвилинку" для висловлення тільки непрактичних ідей.

б) Якщо задачу не вирішено в ході штурму, можна повторити процес рішення (краще це зробити з іншим колективом). Коли ж повторна сесія проводиться з тим же колективом, проблему потрібно обговорити в іншому аспекті або в більш широкому формулюванні, що робить стару задачу невпізнанною. Учасники штурму сприймають її як нову, і це сприяє руху думок по іншому руслу.

Для активізації процесу генерації ідей у ході штурму рекомендується використовувати деякі прийоми, які застосовуються при проектуванні виробів. Такими прийомами є, наприклад, "інверсія", "аналогія" й "фантазія". Керівник може використовувати також списки контрольних питань, запропонованих А. Осборном й іншими авторами (розд. 3.3).

*Синектика* - найбільш сильна зі створених за кордоном методик активізації творчості - є подальшим розвитком мозкового штурму. Вона запропонована американським винахідником і дослідником В. Дж. Гордоном. Роботи в цьому напрямку він почав в 1944 р., аналізуючи діяльність однієї винахідницької групи, що відрізнялася високою продуктивністю, а потім (в 1952 - 1959 р.) запропонував свою методику [9].

Слово "синектика" у перекладі із грецької означає "сполучення різнорідних елементів". У повному словнику англійської мови дано таке визначення: "Синектичні групи - групи людей різних спеціальностей, які зустрічаються з метою спроби творчих рішень проблем шляхом необмеженого тренування уяви й об'єднання несумісних елементів". При використанні синектики формують постійні групи (оптимальний склад 5 - 7 чоловік) людей різних спеціальностей, яких навчають винахідницьким прийомам. Бажано навіть, щоб кожний з них мав декілька різних професій.

Теоретичною основою синектики стали ствердження, що творчий процес пізнаваний і може бути раціонально організований, творчі процеси окремої особи й колективу аналогічні, ірраціональний момент у творчості важливіше раціонального; у латентному (схованому) стані перебуває дуже багато творчих здібностей, які можна виявляти й стимулювати. Організація проведення сесії синекторів (синектичне засідання) запозичена з мозкового штурму, однак відрізняється від нього використанням деяких прийомів психологічного настроювання, у тому числі дуже

активним застосуванням аналогій [8, 9].

### 3.5. Морфологічний аналіз

Морфологічний аналіз розроблено у 1942 р. швейцарським астрономом Ф. Цвіккі. За допомогою методу морфологічного ящика [18, 20], найбільш проробленим із усіх методів морфологічного аналізу, створених Ф. Цвіккі, ученому вдалося за короткий час одержати значну кількість оригінальних технічних рішень у ракетобудуванні.

Морфологічний аналіз випередив еру системних досліджень і став першим яскравим прикладом системного підходу в області винахідництва. На думку Ф. Цвіккі, предметом методу морфологічного ящика є проблема взагалі (технічна, наукова, соціальна й т. д.). Він допускає, що точне формулювання проблеми автоматично розкриває найбільш важливі параметри, від яких залежить її вирішення, і кожен такий параметр може описуватися низкою значень [9, 20]. Причому будь-яке сполучення значень параметра вважається принципово можливим. Основний принцип такого аналізу, зокрема методу морфологічного ящика, складається в систематичному дослідженні всіх мислимих варіантів, що впливають із закономірностей будови (тобто морфології) системи, що удосконалюється.

Морфологічний метод дослідження - був застосований до цілого ряду систем: за твердженням Ф. Цвіккі, більше 70 великих промислових фірм використовували його при вирішенні різноманітних науково-технічних задач. У результаті застосування свого методу сам Ф. Цвіккі створив серію оригінальних винаходів, у тому числі балістичні пристрої, оригінальні силові установки, вибухові речовини, спосіб комбінованої фотографії й т. д.

Сутність аналізу полягає в наступному. У технічній системі, що удосконалюється, виділяють декілька характерних для неї структурних або функціональних морфологічних ознак. Кожна ознака може характеризувати, наприклад, якийсь конструктивний вузол системи, якусь її функцію, якийсь режим роботи системи, тобто параметри або характеристики системи, від яких залежить рішення проблеми й досягнення основної мети.

За кожною виділеною морфологічною ознакою створюють список її різних конкретних варіантів і альтернатив. Ознаки з



їхніми альтернативами можна розташовувати у формі таблиці (морфологічний ящик), що дозволяє краще уявити собі пошукове поле. Перебираючи всі можливі сполучення альтернативних варіантів виділених ознак, можна виявити нові варіанти рішення задачі, на які при простому переборі могли не звернути уваги.

Метод передбачає виконання робіт у п'ять етапів [29].

*Точне формулювання задачі, що підлягає рішенню.* Якщо спочатку ставиться питання про одну конкретну систему, метод безпосередньо узагальнює пошук на всі можливі системи з аналогічною структурою й у підсумку дає відповідь на більш загальне питання. Наприклад, необхідно вивчити морфологічний характер усіх видів транспортних засобів і запропонувати нову ефективну конструкцію пристрою для транспортування по снігу - снігохода.

*Складання списку усіх морфологічних ознак, тобто усіх важливих характеристик об'єкту, його параметрів, від яких залежить рішення проблеми й досягнення основної мети.* Точне формулювання задачі й визначення класу досліджуваних систем дозволяють розкрити основні ознаки або параметри, що полегшують пошук нових рішень. Стосовно до транспортного засобу (снігоходу) морфологічними ознаками можуть бути: *A* - двигун, *B* - рушій, *B* - опора кабіни, *Г* - керування, *Д* - забезпечення заднього ходу й т. д.

*Розкриття можливих варіантів за кожною морфологічною ознакою (характеристикою) шляхом складання матриці.* Кожна з *n* характеристик (параметрів, морфологічних ознак) має певне число  $k_i$  різних варіантів, незалежних властивостей, конкретних форм. Наприклад, для снігоходу варіанти:  $A_1$  - двигун внутрішнього згоряння,  $A_2$  - газова турбіна,  $A_3$  - електродвигун і т. д.;  $B_1$  - повітряний гвинт,  $B_2$  - гусениці,  $B_3$  - лижі,  $B_4$  - снігомет і т. д.;  $B_1$  - опора кабіни на сніг,  $B_3$  - на двигун,  $B_4$  - на рушій і т. д. Сполучення одного з можливих варіантів морфологічної ознаки з іншими від кожної ознаки дає одне з можливих технічних рішень.

Якщо побудувати *n*-мірний простір (де *n* - кількість морфологічних ознак) і на кожній з осей, що належить одному з ознак, відкласти всі можливі його варіанти, то одержимо "морфологічний ящик" (назва вдала для тривимірного простору, тобто для трьох ознак). Кожна точка його, що визначається *n*

конкретними координатами, містить одне можливе технічне рішення.

*Визначення функціональної цінності всіх одержаних варіантів рішень.* Це найбільш відповідальний етап методу. Щоб не заплутатися у величезному числі рішень і деталей, оцінка їхніх характеристик повинна проводитися на універсальній й, по можливості, простій основі, хоча це не завжди легка задача.

Повинні бути розглянуті всі  $N$  варіантів рішень, що виходять зі структури морфологічної таблиці, і проведено їхнє порівняння за одним або декількох найбільш важливим для даної технічної системи показникам.

*Вибір найбільш раціональних конкретних рішень.* Знаходження оптимального варіанту може здійснюватися за кращим значенням найбільш важливого показника технічної системи.

Морфологічний аналіз створює основу для системного мислення в категоріях основних структурних ознак, принципів і параметрів, що й забезпечує високу ефективність його застосування. Це впорядкований спосіб дослідження, що дозволяє домогтися систематичного огляду всіх можливих рішень даної великомасштабної проблеми. Метод будує мислення таким чином, що генерується нова інформація, що стосується тих комбінацій, які при безсистемній діяльності не беруться до уваги.

Хоча морфологічному способу мислення внутрішньо властиве переконання, що всі рішення можуть бути реалізовані, при цьому, природно, багато які з них виявляються порівняно тривіальними. Труднощі застосування морфологічного аналізу полягає в тім, що не існує якого-небудь дійсно практичного й універсального методу оцінки ефективності того або іншого варіанту рішення. Якби він був знайдений, то можна було, виходячи тільки з теоретичних міркувань, вибирати оптимальну комбінацію елементів для кожного проєктованого пристрою [18]. Таким чином, процес винаходу був би замінений безпосереднім аналізом альтернативних варіантів з використанням ЕОМ. Як правило, робочі характеристики пристрою, в основу побудови якого покладено раніше невідому комбінацію елементів, є більш-менш невизначеними.

### 3.6. Узагальнений евристичний метод

Узагальнений евристичний метод (або алгоритм) був розроблений колективом лабораторії математичних методів оптимального проектування Марійського політехнічного інституту (Росія) на базі проведеного наукового аналізу більше 30 відомих методів пошуку технічних рішень, активізації й раціональної організації творчої діяльності [2, 18].

Ця методика містить ряд розробок авторів, а також раціональні прийоми й процедури з деяких інших методів, у тому числі: морфологічного ящика, функціонального винахідництва, організовуючих понять й ін. Таке сполучення, робить методику досить повною й універсальною, яку можна застосовувати для рішення різних задач у багатьох галузях техніки.

У табл. 3 наведені основні етапи узагальненого методу й виконувані процедури стосовно до задач проектування технічних виробів [6].

Таблиця 3 - Етапи й процедури узагальненого евристичного методу

Найменування й призначення етапу	Процедури
<i>Етап 1. Попередня постановка задачі. Формулювання функції розроблювальної технічної системи.</i>	1.1. Формулювання функції технічного виробу (системи) на якісному рівні. 1.2. Формулювання функції виробу на кількісному рівні. 1.3. Вибір існуючих виробів, що у найбільшій мері задовольняють сформульовані функції. 1.4. Складання списку недоліків існуючих виробів. 1.5. Складання попереднього формулювання задачі. 1.6. Формулювання задачі без спеціальних термінів.
<i>Етап 2. Вивчення й аналіз задачі.</i>	2.1. Складання дерева конструктивної еволюції розглянутого класу технічних виробів (систем). 2.2. Виявлення тенденцій розвитку розглянутого класу виробів. 2.3. Збір і вивчення інформації щодо прогнозу розвитку розглянутого класу виробів.

Продовження табл. 3

Найменування й призначення етапу	Процедури
<p>Вивчення еволюції і тенденцій розвитку розглянутої й функціонально близьких класів технічної системи для виявлення можливості посилення окремих показників функції.</p>	<p>2.4. Визначення основних факторів, що мають вирішальний вплив на розвиток розглянутого і провідного класів виробу.</p> <p>2.5. Визначення можливості посилення окремих характеристик функції.</p> <p>2.6. Проведення ранжирування недоліків з точок зору ступеня важливості й труднощів їхнього усунення.</p> <p>2.7. Виявлення причин виникнення недоліків в існуючому технічному виробі.</p> <p>2.8. Вивчення можливості комбінування цілей рішення задачі (для виділення взаємопідсилюючих, взаємосуперечливих і взаємозалежних цілей).</p> <p>2.9. Перевірка реальності постановки задачі на сучасному рівні розвитку науки, техніки й виробництва.</p> <p>2.10. Вивчення умов досягнення цілей і виділення сприятливих і несприятливих факторів, що сприяють або заважають досягненню цілей.</p> <p>2.11. Побудова ієрархічної структури технічного виробу (системи) і встановлення зв'язків між елементами розглянутого виробу й інших суміжних об'єктів.</p> <p>2.12. Перевірка можливості задоволення потреби шляхом внесення змін у суміжні об'єкти.</p> <p>2.13. Оцінка ступеня актуальності поставленої задачі у цей час й у доступному для огляду майбутньому.</p> <p>2.14. Створення уявлення щодо гранично можливого технічного рішення розглянутого класу виробів.</p>

Продовження табл. 3

Найменування й призначення етапу	Процедури
<p><i>Етап 3. Уточнення й деталізація постановки задачі.</i> Включення в список вимог експлуатаційних, конструктивних, технологічних, ремонтних, економічних й ін. вимог з їхньою якісною оцінкою.</p>	<p>3.1. Складання списку вимог до існуючих технічних виробів, що найбільш задовольняють сформульованій функції. 3.2. Складання списку вимог до розроблювального технічного виробу. 3.3. Порівняння списку вимог з показниками провідного класу технічного виробу. 3.4. Виділення вимог, які свідомо не можна міняти при вирішенні задачі. 3.5. Виявлення шляхом аналізу й експертних оцінок помилкових вимог і виключення їх зі списку. 3.6. Виділення головних вимог до розроблювального виробу. 3.7. Виділення нових вимог, які не мали місця в існуючих близьких технічних виробих. 3.8. Визначення вхідних і вихідних параметрів розроблювального технічного виробу. 3.9. Виявлення функціональних зв'язків між вхідними й вихідними параметрами. 3.10. Виявлення протиріччя поліпшення виробу. Графічне зображення протиріччя поліпшення. 3.11. Вибір найбільш важливих для вирішення задачі й важкоусувних протиріччя поліпшення.</p>
<p><i>Етап 4. Пошук технічних ідей, рішень і фізичних принципів дії.</i> Синтез розширеної множини нових технічних і фізичних принципів дії, з яких необхідно вибрати найкраще рішення. Всі процедури</p>	<p>4.1. Перетворення у бажане технічне рішення найбільш близьких рішень існуючих технічних виробів. 4.2. Перетворення в бажане технічне рішення кращих світових зразків. 4.3. Перетворення в бажане рішення гранично досконалого технічного виробу. 4.4. Перетворення в бажане технічне рішення прогнозованих конструктивних рішень. 4.5. Перетворення в бажане рішення аналогічних рішень із провідного класу</p>

Продовження табл. 3

Найменування й призначення етапу	Процедури
даного етапу, крім 4.9 - 4.11, реалізуються при активному використанні евристичних прийомів (розд. 2.4).	<p>технічного виробу.</p> <p>4.6. Перетворення в бажане рішення старих практично використовуваних виробів або у свій час відкинутих.</p> <p>4.7. Змінення вищестоящої по ієрархії системи.</p> <p>4.8. Рішення задачі шляхом усунення причин виникнення недоліків прототипів.</p> <p>4.9. Використання методів морфологічних таблиць.</p> <p>4.10. Формулювання нових фізичних принципів дії технічного виробу (системи) і її основних елементів.</p> <p>4.11. Використання методу гірлянд асоціацій і метафор.</p>
<p><i>Етап 5. Вибір найкращих технічних рішень.</i></p> <p>Різнібічний аналіз й оцінка всіх знайдених технічних рішень.</p>	<p>5.1. Перевірка отриманих рішень на фізичну й технологічну здійсненність.</p> <p>5.2. Перевірка рішень на їхню відповідність основним вимогам.</p> <p>5.3. Класифікація варіантів технічних рішень по фізичному принципу дії, основним конструктивним, технологічним, експлуатаційним й іншим ознакам для проведення групової обробки рішень.</p> <p>5.4. Вибір найбільш економічних варіантів, що дозволяють вирішувати задачу при мінімальних витратах: матеріалів, експлуатаційних, технологічних і т. п.</p> <p>5.5. Вибір технічних рішень, які за основними показниками не нижче кращих світових зразків.</p> <p>5.6. Вибір технічних рішень, у яких найбільша частка стандартних вузлів і деталей.</p> <p>5.7. Вибір рішень, що найбільш повно усувають головні протиріччя поліпшення технічного виробу або найбільш повно реалізують сформульовану функцію, головні</p>

Продовження табл. 3

Найменування й призначення етапу	Процедури
	цілі й вимоги. 5.8. Вибір рішень, що вимагають мінімальної або значної зміни в суміжних технічних виробках.
<i>Етап 6. Доробка обраних технічних рішень.</i> Детальна проробка технічних рішень, їхнє подальше поліпшення експериментальна й дослідна перевірка.	6.1. Перевірка найкращих рішень на їхню відповідність повному списку вимог. 6.2. Перетворення неприпустимих рішень у припустимі. 6.3. Визначення можливих змін у суміжних технічних виробках усього комплексу, що включає розроблювальний виріб. 6.4. Визначення оптимальних значень основних параметрів найкращих технічних виробів. 6.5. Ранжирування найкращих рішень по комплексу критеріїв якості. 6.6. Розробка технічних креслень, проведення експериментальної й дослідної перевірки для найкращих рішень. 6.7. Виявлення недоліків у технічних рішеннях після експериментальної перевірки.
<i>Етап 7. Аналіз техніко-економічних показників знайдених рішень й оцінка перспектив їхнього впровадження.</i>	7.1. Оцінка очікуваного ефекту від використання одержаних технічних рішень. 7.2. Оцінка перспективності знайдених рішень. 7.3. Визначення області практичного застосування й ринків збуту. 7.4. Оцінка очікуваного економічного ефекту залежно від обсягів реалізації нових технічних виробів. 7.5. Складання заявок на винаходи.

На етапі 4 узагальненого методу, метою якого є пошук ідей і рішень, крім процедур пошуку активно використовуються евристичні прийоми, які надано в розд. 2.4. Під евристичним прийомом розуміється короткий припис, що вказує на те, як перетворити відоме технічне рішення (прототип), щоб одержати

нове технічне рішення, або як синтезувати нове рішення.

### 3.7. Інші методи пошуку технічних рішень

Існують й інші методи, що мають також ряд раціональних сторін (див. табл. 2). З них можна виділити групу, засновану на комбінаторному підході й за цією ознакою схожу з морфологічним аналізом. Це методи організуючих понять, "матриць відкриття" і десяткових матриць пошуку [18].

Метод організуючих понять, розроблений Ф. Ханzenом в 1953 р., найбільш близький по своїй сутності до морфологічного ящика й припускає проведення роботи в декілька етапів [28].

- 1) Визначення організуючих понять і їхніх відмітних ознак.
- 2) Класифікація організуючих понять по ступені їхньої важливості.
- 3) Проведення наочних зіставлень організуючих понять із їхніми відмітними ознаками й розробка на цій основі керівного матеріалу для всіх можливих рішень, що відповідають обраним обмеженням.
- 4) Оцінка ознак відносно їх відповідності спеціальним вимогам завдання.
- 5) Комбінація ознак різних організуючих понять у рішення.

До особливостей і відмінностей методу організуючих понять від морфологічного ящика належать складання за особливою формою керівних матеріалів для певного класу задач, графічне подання організуючих понять й їхніх ознак, а також класифікація ознак по важливості, спрямована на раціональне скорочення варіантів рішення.

Метод "матриць відкриття", запропонований А. Модем (Франція) в 1955 р., також трохи схожий на морфологічний аналіз. Спрощено суть методу, що полягає в побудові таблиці, у якій перетинаються два ряди характеристик. Якщо в морфологічному аналізі всі обрані характеристики ставляться до будови технічного об'єкту, то в цьому методі частина з них може відноситися, наприклад, до умов споживання, виробництва, експлуатації й т. д. (матриця: потреби замовника - можливості підрядника). Сам метод не дає закінчених рішень, але створює можливість для асоціацій, постановки нових проблем, які іншим методом не були б взяті до уваги.



Існує багато варіантів матриць, у тому числі кількісні, що тяжіють до матричних методів математики, і якісні, що дають передумови для асоціацій. Прямокутні матриці припускають перетинання двох різних рядів характеристик, а квадратні - перетинання ряду із самим собою.

Найчастіше цей метод служить для систематизації наявного матеріалу й дає відправні пункти для подальших досліджень, виявляючи наявні резерви.

Метод десяткових матриць пошуку, розроблений Р.П. Повілейко, включає пошук нових технічних рішень на основі аналізу результатів систематичного застосування десяти евристичних прийомів до кожного з десяти основних показників технічної системи [22].

У якості основних виділяються наступні групи показників технічної системи: геометричні (довжина, ширина, висота, площа й т. д.); фізико-механічні (вага, міцність, корозійна стійкість, еластичність й ін.); енергетичні (вид енергії, к.к.д. й ін.); конструкційно-технологічні (технологічність, транспортабельність, складність й ін.); надійність і довговічність; експлуатаційні (продуктивність, точність, стабільність параметрів й ін.); економічні (собівартість, трудові витрати на виробництво й експлуатацію, втрати й ін.); ступінь стандартизації й уніфікації; зручність обслуговування й безпека (шум, вібрації, освітленість, температура й ін.); художньо-конструкторські (гармонійність, масштабність й ін.).

Для перетворення основних показників використовують наступні групи евристичних прийомів:

*Неологія* - перенесення у дану галузь техніки нових для неї значень основних показників технічних об'єктів.

*Адаптація* - пристосування відомих процесів, конструкцій, форм, матеріалів й їхніх властивостей до даних конкретних умов.

*Мультиплікація* - множення, збільшення основних показників (наприклад, мультиплікація конструкторсько-технологічних показників пов'язана зі збільшенням числа робочих органів, робочих позицій, кількості одночасно оброблюваних деталей).

*Диференціація* - пов'язана з диференціацією показників (дроблення, поділ, очищення й т. д.).

*Інтеграція* - пов'язана з інтеграцією показників (додавання, з'єднання, змішування, зближення й т. д.).

*Інверсія* - зміна порядку на протилежний, повернення, вивертання й т. д.

*Імпульсація* - пов'язана з імпульсними змінами показників технічних об'єктів.

*Динамізація* - пов'язана з динамізацією, зміною в часі ваги, температури, розмірів, кольору й інших показників технічних об'єктів.

*Аналогія* - відшукування й використання подібності, подоби в якому-небудь відношенні показників даного технічного об'єкту й відомих об'єктів.

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

Така класифікація дозволяє побудувати десяткову матрицю пошуку, у рядках якої записані основні показники, що змінюються, характеристики технічного об'єкту, а в стовпцях - основні групи евристичних прийомів. Кожен її осередок відповідає певній зміні якого-небудь із основних параметрів об'єкту й готових технічних рішень ще не містить, але сприяє виникненню асоціацій, що активізують пошук ідеї рішення.

Комбінаторний принцип застосовується також на деяких етапах методики семиразового пошуку, розробленої Г.Я. Бушем, що має стратегічну й тактичну частини. Особливістю методики є розподіл всіх стадій й елементів процесу пошуку рішення на 7 частин, що зв'язані зі здатностями людського мозку сприймати й переробляти інформацію. Стратегія пошуку складається з аналізу проблемної ситуації й суспільних потреб, аналізу функцій аналогів і прототипу, постановки задачі, генерування ідей і вибору евристичних засобів, конкретизації ідей, оцінки варіантів і вибору оптимального, спрощення, розвитку й реалізації рішення. Тактична частина – числові прийоми, застосовувані на різних стадіях рішення. Серед них використовуються прийом "сім ключових слів" і таблиці, аналогічні десятковим матрицям пошуку, але розміром 7x7 [9].

Із програмних (алгоритмічних) методик пошуку нових технічних рішень становить інтерес, що одержала широке поширення в Німеччині, методика систематичної евристики, що

була розроблена під керівництвом І. Мюллера й успішно використовується в ряді науково-дослідних і навчальних організацій [9, 18].

Методика призначена для раціональної організації праці інженерів, конструкторів і науковців. Вона містить комплекс програм, створених на основі системного підходу й евристичного програмування, що дозволяє використовувати їх при конструюванні й проектуванні.

Функціонально-вартісний аналіз є методикою раціоналізації, тобто вдосконалення конструкцій і процесів з метою зниження їхньої вартості й витрат, переважно без зміни основних принципів, що лежать у їхній основі. Методика будується на тім, що деталь машини вдосконалити легше, ніж машину. Застосування його дозволяє знизити вартість виробів на 5 – 20 %.

У зв'язку з тим, що близько 75 % витрат на виробництво виробу припадає на стадію наукових досліджень і проектно-конструкторських розробок, важливо уникнути зайвих витрат саме на цій стадії. Тому задачі функціонально-вартісного аналізу вирішуються шляхом правильного визначення функцій і характерних ознак систем виробів, їхніх складових елементів, розробкою конструкторських рішень відповідно до цих функцій й ознак [21].

Функціонально-вартісний аналіз проводять переважно постійні дослідницькі групи чисельністю 3 - 6 чоловік. У їхньому складі обов'язково перебувають конструктори, технологи й економісти. Роботи з використанням методики ведуться за робочим планом приблизно в такій послідовності.

*Підготовчий етап.* Вибір об'єкту дослідження й визначення цілей аналізу; підготовка переліку інформаційних матеріалів; складання, обговорення й затвердження плану проведення аналізу об'єкта.

*Інформаційний етап.* Збір оптимальної кількості інформації для визначення особливостей і структури досліджуваного об'єкта і його аналогів; систематизація інформації і її вивчення для опису об'єкта, з'ясування його фактичного стану; виявлення й формулювання функцій; побудова схеми взаємозв'язку складових частин досліджуваного об'єкта; визначення витрат на створення й функціонування об'єкта і його складових частин; виявлення зон

найбільшого зосередження витрат у досліджуваному об'єкті.

*Аналітичний етап.* Аналіз й уточнення функцій, визначення основних, допоміжних, виявлення непотрібних функцій у досліджуваному об'єкті і його складових частинах; розмежування й аналіз витрат, пов'язаних зі здійсненням функцій; порівняння функцій складових частин і витрат на їхнє здійснення з аналогами; порівняння функцій і витрат аналогічних систем і рішень; уточнення пошуку резервів економії в аналізованому об'єкті по функціональних зонах; формування задач пошуку нових ідей і варіантів оптимальних рішень.

*Творчий етап.* Уточнення напрямку й задач пошуку нових рішень; визначення тематики, організація й проведення нарад по висуванню ідей; обробка й систематизація результатів нарад для їхньої наступної оцінки; підготовка матеріалів для оцінки одержаних результатів функціональними службами.

*Дослідний етап.* Систематизація запропонованих варіантів нових рішень; виключення явно нездійснених пропозицій й експертиза пропозицій, що залишилися; дослідження й при необхідності експериментальна перевірка різних можливостей виконання функцій у запропонованих варіантах; оцінка здійсненності пропозицій, що залишилися, з погляду матеріально-технічного, фінансового, виробничого забезпечення; визначення витрат й економічності виконання функцій для різних варіантів рішень; ранжирування варіантів і вибір оптимального.

*Рекомендаційний етап.* Оформлення рекомендацій з реалізації пропозицій остаточно обраних варіантів рішень із уточненням розрахунків ефективності; узгодження рекомендацій із зацікавленою стороною й подання їх на обговорення керівництву; обговорення представлених рекомендацій і прийняття рішень; складання проекту й затвердження плану-графіка впровадження рекомендацій.

*Етап впровадження.* Організація роботи з реалізації рекомендацій; контроль за виконанням плану-графіка; впровадження одержаних результатів у виробництво; оцінка одержаних результатів, зіставлення їх з попередніми даними.

У додатку 2 представлено універсальний метод [17], що відображає основні правила системного проектування, на прикладі розробки дизайну яхти.

Даний метод становить інтерес, тим, що в ньому представлено стратегії й правила компоновання елементів технічного виробу (системи).

### **Питання для самостійного контролю**

1. Перелічіть класифікаційні групи існуючих методів пошуку рішень при проектуванні нових технічних виробів.

2. Які ви знаєте методи пошуку нових технічних рішень?

3. У чому суть асоціативних методів пошуку? Приведіть методи які відносяться до асоціативних методів.

4. Особливості методу контрольних питань. Які списки питань найпоширеніші?

5. Опишіть методи психологічної активізації колективної творчої діяльності.

6. Задачі методів прямого й зворотного мозкового штурму?

7. Правила проведення методу мозкового штурму?

8. Відмінності методів "синектика" й "мозковий штурм".

9. Особливості морфологічного аналізу як системного підходу в області винахідництва. Етапи виконання робіт при морфологічному аналізі.

10. Перелічіть основні етапи проектування технічного виробу при використанні узагальненого евристичного методу.

11. Які ви знаєте методи, створені на основі морфологічного аналізу.

12. Особливості функціонально-вартісного аналізу.

13. Стратегії й правила компоновання елементів технічного виробу на основі системного підходу.

## РОЗДІЛ 4

### МОЖЛИВОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ

У даному розділі представлено огляд інтегрованих систем проектування виробів щодо їхніх можливостей для виконання інженерних завдань дослідження конструкції виробу. Дано загальне уявлення щодо методу скінчених елементів, що використовується в інтегрованих системах для виконання інженерних розрахунків. Розглянуто можливості комп'ютерної системи COSMOS щодо виконання інженерних розрахунків на етапі проектування технічних виробів.

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

На сьогодні розроблено й має застосування у машинобудуванні різні системи й пакети програм для 3D-моделювання, що відрізняються своїми можливостями, ступенем узагальнення, використовуваними математичними методами, якістю інтерфейсу, рівнем сервісу. Найбільш популярні з таких систем представлені у додатку А.

Використання інформаційно-комп'ютерних технологій на етапах створення й виробництва виробів дозволяє: підвищити якість виробів; знизити витрати на виконання робіт; скоротити час підготовки виробництва виробів.

Ці технології відомі як CALS-технології (Computer-Aided Logistics Support). Вони забезпечують керування життєвим циклом виробу на всіх етапах: розробки концепції виробу; проведення науково-дослідних робіт; проектування; виробництва; експлуатації виробу; модернізації виробу; забезпечення ремонту й технічного обслуговування виробу; утилізації.

Здебільшого інформаційні технології, що використовуються на етапах проектування й виробництва можна поділити на наступні класи:

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

- CAE (Computer Aided Engineering) – системи автоматизованого інженерного аналізу деталей і машин (Nastran, Ansys, Compas й інші);
- PDM (Product Data Management) – системи автоматизованого керування базами даних щодо виробу (IMAN, Optegra, Enivia й інші);
- Project Management – автоматизовані системи керування процесом проектування й системи планування (WorkFlow, DocFlow і Project Planing);
- MRP (Material Requirements Planning) – автоматизовані системи керування виробництвом (SAP R/3, BAAN, Галактика й інші).

Сучасні інтегровані системи проектування, як правило, містять засоби для конструкторсько-технологічного проекту, аналізу і прочностному розрахунку, керування підприємством та супровід виробу в експлуатації.

У системі *UNIGRAPHICS* такими засобами є:

*CAD* – система автоматизованого проектування;

*CAM* – система автоматизованого виробництва;

*CAE* - система інженерних розрахункових досліджень.

В останню систему (CAE) входить пакет прикладних програм системи *ANSYS*, що забезпечує дослідницькі й проектні розрахунки у взаємозв'язку з іншими системами.

Система *CADDS 5* забезпечена наступними засобами:

*CADDS 5/OPTEGRA* – конструкторсько-технологічний проект;

*PATRAN/NASTRAN* – аналіз і розрахунок міцності;

*SAPR3* – керування підприємствами;

*Windchill* - супровід виробу в експлуатації.

У багатьох інтегрованих системах проектування, як правило, немає вбудованих модулів аналізу й розрахунку міцності. Вони користуються універсальними модулями або модулями інших систем.

Найпоширеніші універсальні модулі аналізу й розрахунку міцності *PATRAN/NASTRAN*, *ANSYS* и *COSMOS*. У розд. 4.4 розглядається пакет *COSMOS*.

Розрахунковий пакет *PATRAN/NASTRAN* (NASA Structural Analysis) входить до складу інтегрованої системи проектування

*CADDS5*. Цей пакет один з найбільш потужних і розгалужених щодо можливостей дослідження. 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* розроблено у 80-і роки. Розроблювач пакету компанія *Structural Research & Analysis Corp (SRAC)*, що поставляє на ринок цілий ряд програмних продуктів, які дозволяють вирішувати широкий спектр інженерних задач практично у всіх галузях промисловості, науки й освіти. Пакет широко використовується у різних інтегрованих системах автоматизованого проектування.

Всі перераховані пакети призначено для інженерних і науково-дослідних розрахунків, що забезпечують розробку технічного виробу (системи). Вони схожі по ідеології своєї побудови, використовуваним математичним моделям і методам їхньої реалізації, переліку розв'язуваних задач, дозволяють взаємний обмін даними й результатами розрахунків.

Всі ці пакети (в універсальній комплектації) дозволяють вирішувати наступні класи задач:

- визначення переміщень, деформацій і напруг у конструкції технічного виробу при статичних впливах (лінійна статика);
- розрахунок стійкості конструкції;
- визначення напружено-деформованого стану конструкції з використанням нелінійних моделей (фізична, геометрична нелінійність);
- напружено-деформований стан при контакті твердих тіл;
- напружено-деформований стан в елементах конструкції при наявності тріщин;
- аналіз частот і форм власних коливань конструкції;
- динамічний гармонійний аналіз і випадковий відгук - оцінка поведінки конструкції при зовнішньому полігармонійному або випадковому впливі;
- динамічні перехідні процеси - розрахунок поведінки конструкції в часі при дії на неї нестационарного зовнішнього навантаження;
- аналіз руйнування конструкції від втомленості;



- аналіз стаціонарної й нестаціонарної гідродинаміки;
- аналіз електромагнітних процесів;
- стаціонарні й нестаціонарні нелінійні теплові процеси - визначення поширення теплових потоків, аналіз температурних полів і деформацій;
- визначення чутливості результатів всіх видів аналізу до зміни конструкторських параметрів;
- багатокритеріальна оптимізація з використанням одночасно обмежень різного типу, з можливістю керування ходом процесу;
- метод субконструкції - статична конденсація;
- адаптивний аналіз напружень.

У цих пакетах в основу побудови математичних моделей, взято метод скінчених елементів. Ідея методу у моделюванні реального об'єкту сукупністю скінчених елементів (одномірних, двовимірних, тривимірних), виконанні умов їхнього з'єднання, напруги, закріплення й аналізу напружено-деформований стану такої скінчено-елементної моделі.

Алгоритм рішення задач із використанням САЕ пакетів:

- Побудова геометричної моделі технічного виробу або системи (або експорт цієї моделі з CAD модуля).
- Вибір типу скінчених елементів з бібліотеки пакета для кожної зони конструкції виробу.
- Задавання властивостей матеріалів для кожної зони конструкції.
- Задавання геометричних характеристик елементів у зонах конструкції (залежно від обраного типу елемента). Ці характеристики різні для різних типів елементів: для оболонкових елементів, наприклад, це товщина, для балкових - площа поперечного перерізу, моменти інерції, ширина, висота й ін.
- Побудова скінчено-елементної моделі (розбивка конструкції на скінчені елементи).
- Перевірка правильності побудови скінчено-елементної моделі і її коректування (злиття співпадаючих вузлів, перенумерація вузлів й елементів).
- Закріплення скінчено-елементної моделі (задавання нульових або певних переміщень). Робиться у вузлах, але може бути зроблене з використанням атрибутів геометричної моделі (точки, лінії, поверхні), якщо вони асоціюються з відповідними

вузлами.

- Навантаження моделі (зосереджена і/або розподілене навантаження) по вузлах, лініям і поверхням. Конкретні можливості навантаження треба розглядати стосовно до певних особливостей пакета.

- Експорт даних скінчено-елементної моделі в модуль розрахувача. Цей етап має місце, якщо в різних модулях створюється модель й виконуються розрахунки.

- Розрахунок створеної скінчено-елементної моделі в конкретному модулі розрахувача залежно від типу завдання.

- Висновок й інтерпретація результатів розрахунку (на екран, у вихідний файл).

Сучасні САЕ пакети дозволяють створювати моделі, що складаються з півмільйона елементів (при відповідній конфігурації пакету й обчислювальних засобів), при цьому розрахувачем вирішуються системи більш ніж 5 мільйонів лінійних рівнянь, що вимагає великих обсягів пам'яті й швидкодії.

У розд. 4.2 розглянуто більш докладно методи, що використовуються при рішенні інженерних задач в САЕ пакетах.

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

Фізичні процеси, що характеризують напружено-деформований стан твердих тіл, рух і теплообмін рідкого середовища, моделюються різними програмами за допомогою методів розглянутих у цьому розділі. У даному підрозділі, із загальнотеоретичної точки зору розглянуто метод скінчених елементів, метод скінчених об'ємів і методи оптимізації при рішенні інженерних задач [1, 5, 26].

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

Метод скінчених елементів (МСЕ) на сьогодні є стандартом при рішенні задач механіки твердого тіла за допомогою числових алгоритмів. МСЕ зайняв лідируюче положення завдяки можливості моделювати широке коло об'єктів й явищ (абсолютну більшість конструктивних елементів, вузлів і конструкцій, виготовлених з найрізноманітніших матеріалів, що мають різну природу). Але при використанні даного методу, як і будь-якої числової апроксимації

питання відповідності між розрахунковою моделлю й реальністю є, мабуть, основним при використанні програм аналізу. Незважаючи на те, що такі програми мають більш-менш докладну документацію, вони однаково залишаються деякою мірою чорними ящиками. Це означає певну непередбачуваність результатів, а також деяке свавілля в їхній інтерпретації. Отже, якість висновків, прийнятих на основі результатів, залежить від кваліфікації, а також, стосовно до розрахунку на міцність, принципового знайомства з основами МСЕ. Для одержання більш докладної інформації щодо цього методу рекомендуються наступні літературні джерела [10, 31]. У даному розділі розглядається цей метод стосовно до задач механіки деформованого твердого тіла.

#### 4.2.1.1. Поняття скінченного елемента

В основі методу лежить дискретизація об'єкта з метою рішення рівнянь механіки суцільного середовища в припущенні, що ці співвідношення виконуються в межах кожної з елементарних областей. Ці області називаються скінченими елементами. Вони можуть відповідати реальній частині простору, як, наприклад, просторові елементи, або ж бути математичною абстракцією, як елементи стрижнів, балок, пластин або оболонки. У межах скінченного елемента призначаються властивості ділянки об'єкта, що обмежується їм, (це можуть бути, наприклад, характеристики твердості й міцності матеріалу, об'ємна густина і т. д.) і описуються поля потрібних величин (стосовно до механіки твердого тіла це переміщення, деформації, напруження й т. д.). Параметри із другої групи призначаються у вузлах елемента, а потім використовуються функції, що інтерполюють, за допомогою яких відповідні значення можна обчислити в будь-якій точці усередині елемента або на його границі. Задача математичного опису елемента зводиться до того, щоб зв'язати діючі у вузлах фактори. У механіку суцільного середовища це, як правило, переміщення й зусилля.

Розглянемо прямий метод побудови рівнянь, що зв'язують ці фактори в межах скінченного елемента, у припущенні 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  $[E]$ , встановлюється 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 у вершинах елемента, залежно від поля напруг  $\sigma$  з використанням матриці перетворення напруг у вузлові сили  $[A]$ :

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

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.

б. Для надання матриці  $[k]$  властивості симетрії домагаємося заміни матриці перетворення жорсткості матрицею, транспонованою до матриці перетворення переміщень у деформації  $[D]$ . Тоді:

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

Перераховані залежності дозволяють, знаючи переміщення у вузлах, одержати величини сил, а також вирішити зворотну задачу: за заданими силами знайти переміщення, потім деформації й напруження в межах скінченного елемента.

Пряме формулювання, як правило, використовується для одержання матриць жорсткості скінчених елементів стрижнів, балок і пластин, а також для опису процесу теплопровідності.

Для одержання матриць жорсткості просторових елементів найбільш часто використовуються варіаційні принципи, наприклад, принцип мінімуму потенційної енергії. Одержана у такий спосіб матриця жорсткості з пункту б буде обчислюватися як:

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

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:

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

Аналітичний розрахунок інтегралів для матриці жорсткості

неможливий навіть для трикутників із криволінійними сторонами. Тому вдаються до чисельного інтегрування. Воно полягає в заміні інтеграла сумою добутків підінтегральних функцій, обчислених у точках Гауса або в деякій іншій системі точок на відповідні вагові коефіцієнти. Цей процес супроводжується розрахунком величини визначника Якобі. Негативна величина є наслідком виродженості даного скінченного елемента. Як правило, інформація про дану обставину міститься в діагностичних повідомленнях програм.

#### 4.2.1.2. Алгоритм методу скінчених елементів

Маючи математичний апарат для одержання матриць жорсткості скінчених елементів, приведення навантажень, прикладених до поверхні або в об'ємі елемента до зусиль у вузлах, а також рішення зворотної задачі: обчислення полів деформацій і напружень в об'ємі елемента на базі переміщень у вузлах, можна побудувати алгоритм МСЕ. Приведемо один з його варіантів для рішення задач у припущенні лінійної залежності. Конкретні реалізації можуть істотно відрізнятися від даної схеми.

1. Виконується дискретизація об'єму деталі (будується сітка скінчених елементів). Для об'ємного тіла область розбивається (у рамках функціональності *COSMOSWorks*) на тетраедри із гранями, що апроксимована лінійними або параболічними функціями координат. Для поверхневих моделей - на плоскі (лінійна) або криволінійні (параболічна залежність) трикутники.

2. Для просторових скінчених елементів ступенями свободи є переміщення в напрямку осей локальної системи координат елемента.

Для скінчених елементів оболонки до трьох переміщень у кожному вузлі додаються три кута повороту нормалі до серединної поверхні області, апроксимованої елементом, щодо тих же осей.

3. Визначаються залежності для перетворення переміщень і кутів повороту у вузлах до глобальної системи координат.

4. Обчислюються матриці жорсткості скінчених елементів. У формули для розрахунку компонентів матриць жорсткості скінчених елементів крім координат вузлів входять модулі пружності й коефіцієнти Пуансона матеріалів.

5. Одержані матриці жорсткості з використанням залежностей для переходу від локальних систем координат

елемента в глобальні перетворюються в глобальну систему координат.

6. Матриці жорсткості, представлені в глобальних координатах, поєднуються в глобальну матрицю жорсткості  $[K]$ .

7. Призначені граничні умови, статичні й кінематичні, приводяться до навантажень і переміщень у вузлах, вираженим у глобальній системі координат, і включаються в стовпець сил  $[F]$ .

8. Отримана лінійна система рівнянь виду  $[K] \cdot [\Delta] = [F]$  вирішується щодо стовпця переміщень. Це найбільш трудомісткий етап розрахунку. Для рішення використовуються ітераційні або прямі методи.

9. Для кожного скінченного елемента, маючи переміщення (кути повороту) у вузлах й апроксимуючі функції, розраховуються деформації. Якщо елементи лінійні - деформації в межах елементів постійні, якщо елементи параболічні - деформації змінюються лінійно. На основі деформацій обчислюються напруження в елементах. При необхідності (функція програми) напруження у вузлах суміжних елементів осереднюються з наступним перерахуванням напружень у межах кожного елемента.

10. На основі компонентів напружено-деформованого стану й параметрів міцності матеріалу (матеріалів) виконується обчислення еквівалентних напружень за яким-небудь критерієм міцності.

#### 4.2.1.3. Врахування нелінійності в процедурах МСЕ

Досить часто модулі нелінійного аналізу в САЕ програмах є надбудовою над базовою частиною, відповідальною за пружний статичний розрахунок.

Розглянемо деякі аспекти реалізації цих процедур [13, 19, 32].

Нелінійні задачі характеризуються нелінійною залежністю між діючими факторами й реакцією на них системи. Крім того, нерідко граничні умови (прикладені навантаження й переміщення) змінюються в часі. Для урахування цього явища вводиться поняття крива часу (в *COSMOSWorks* - Time curve). Зміст її в тім, що вводиться параметр, що має розмірність часу й, залежно від його величини, призначаються обумовлені їм умови (сила, напруга, переміщення й т. д.). Якщо досліджуваний об'єкт містить матеріал, характеристики якого можуть залежати від часу, то параметр відповідає фізичному часу.

У протилежному випадку - це абстрактна величина, масштаб якої вибирається з міркувань зручності подання кривих (реальний час фігурує також у завданнях динаміки, однак функціональність *COSMOSWorks* не передбачає їх вирішення). Головною вимогою в ході опису зовнішніх факторів є синхронність їхньої дії. Наприклад, якщо на об'єкт, виготовлений з матеріалу, що має властивість фізичної нелінійності, спочатку діє одна сила, а потім, після того як її дія припиняється, інша, то перший фактор розміщується в одному інтервалі, а другий - у наступному. Тривалість цих інтервалів може бути різною. І навпаки, якщо сили в реальності прикладаються одночасно, то розмістити їх треба в тому самому відрізку часу.

Наступна процедура, необхідна для модифікації алгоритму МСЕ стосовно до рішення нелінійних задач, - керування збереженням системою стану рівноваги. У більшості прикладних програм присутні три методи, що використовуються для різних класів задач.

*Метод сил* (Force Control), коли після збільшення навантажень відповідно до кривої часу на величину деякого кроку визначаються переміщення, що задовольняють рівнянням рівноваги. Як правило, метод сил застосовується для задач із фізичною нелінійністю матеріалів. Алгоритм непридатний для моделювання знеміцнюваних систем (тобто коли на деякому етапі збільшення переміщень відбувається без приросту силових факторів).

*Метод переміщень* (Displacement Control), коли для призначеного збільшення переміщень підбирається параметр часу, що визначає діючі в цей момент силові фактори. Даний алгоритм варто використовувати в ситуаціях, коли можлива геометрична нелінійність поведінки конструкції. Алгоритм непридатний для розрахункових схем, коли деформація конструкції під дією прикладених у вигляді граничних умов переміщень на деякому етапі супроводжується зменшенням породжуваних цими переміщеннями сил. Один з варіантів цього явища - прокляцання тонкостінних об'єктів у ході втрати стійкості.

*Метод довжини дуги* (Arc Length Method), відомий у вітчизняній літературі як метод продовження по найкращому параметру. Програма автоматично вводить деякий параметр, який



називається параметром продовження, що входить у додаткове рівняння і включає в рівняння рівноваги. Метод заснований на тім, що на кожному кроці просування уздовж безлічі можливих рішень із урахуванням інформації щодо рішення, одержаних на попередніх кроках. Даний алгоритм варто застосовувати для аналізу закритичного поведіння конструкцій, коли після втрати стійкості відбувається проклацання, і система переходить у новий стан рівноваги.

При рішенні задач, що містять нелінійності, необхідно визначити ітераційний алгоритм для рішення системи нелінійних рівнянь у процесі застосування навантаження. Його функція складається в коректуванні параметрів, що описують стан системи, після кожного кроку збільшення навантаження. Якщо прикласти додаткове навантаження й на основі параметрів жорсткості, що відповідають рівню деформацій, діагностованих на попередньому кроці, розрахувати зусилля у вузлах, то можна обчислити непогодженість між прикладеними й одержаними силами. Далі потрібно почати дії для мінімізації цієї непогодженості. Найбільш популярні два алгоритми.

*Метод Ньютона - Рафсона* (Newton - Raphson), коли дотична матриця жорсткості будується на кожній ітерації в межах будь-якого кроку збільшення навантаження. Сам по собі алгоритм має квадратичну швидкість збіжності й має високу стійкість. Однак необхідність будувати й розкладати матрицю жорсткості вимагає значних обчислювальних ресурсів.

*Модифікований метод Ньютона - Рафсона* (Modified Newton-Raphson), у якому дотична матриця жорсткості на кожному кроці збільшення навантаження будується один раз, а потім використовується на всіх субітераціях у межах кроку. Цей алгоритм вимагає більшого числа ітерацій, однак час заощаджується за рахунок скорочення операцій з матрицею жорсткості.

Ще одна група алгоритмів, які відрізняють нелінійний розрахунок від лінійного і визначають момент закінчення ітерацій як у межах кроку збільшення навантаження, так й у момент закінчення цих збільшень. Це досить специфічне питання, і тому - на даному рівні викладу - можна порекомендувати при визначенні відповідних параметрів вирішити його експериментальним

шляхом. Відзначимо, що залежно від алгоритму керування ітераційним процесом (метод сил, переміщень, довжини дуги) використовуються критерії збіжності по переміщеннях, величині невірноважених навантажень, балансі енергії.

#### 4.2.2. Методи оптимізації в інженерному аналізі

Основна задача інженерної діяльності є створення "найкращих" конструкцій. Вона вирішується за допомогою декількох інструментів. Перший – виконання відповідно до певних нормативів і стандартів, у яких закладено досвід "попередніх поколінь". Ці джерела створювалися різними шляхами: систематизацією досвіду, експериментальним відпрацюванням, не виключено й випадки, коли аргументи розроблювачів стандартів не занадто легко зрозуміти. Проте, у переважній більшості ситуацій дотримання нормативів є найбільш надійний шлях. Також конструктори використовують інженерну інтуїцію, практичні навички, досвід попередніх розробок. Іноді цей шлях дає непогані результати, особливо коли вирішуються концептуальні питання - алгоритми генерації нових знань, незважаючи на певний прогрес у деталях. Ще один спосіб створення "кращих" виробів - використання алгоритмів оптимального проектування. Зрозуміло, що найбільш підходящим варіантом є спільне використання всіх засобів.

Для одержання систематичних знань в області оптимального проектування, рекомендуємо [11, 23].

##### 4.2.2.1. Алгоритми оптимізації

Алгоритми оптимізації поділяються на параметричні й ті, які пов'язані з аналізом чутливості. Ціль перших - підбір змінних, що описують геометрію (це найпоширеніший випадок), характеристик матеріалів, параметрів армування матеріалів і т. д.

*Аналіз чутливості* передбачає одержання форми тіла, що задовольняє заданим вимогам. Одним з розходжень між методами є те, що параметрична оптимізація припускає опис форми тіла через деякі параметри. Потім ці параметри враховуються при побудові об'єкту. Далі будується геометрична модель, після чого для неї виконуються необхідні розрахунки. При цьому інформація про параметри проектування необхідна тільки на етапах пошуку оптимуму й формування моделі. У прикладних розрахунках вона

не використовується (для розрахунку МСЕ або іншого чисельного алгоритму зовсім не обов'язково). Методи аналізу чутливості припускають, що об'єктом пошуку є форма об'єкта. Наприклад, якщо аналізується пластина на згин, то це товщини всіх скінчених елементів, на які вона розбита. Якщо проектується ферма (спорудження зі скріплених стрижнів), то це параметри перетинів стрижнів, що утворюють розрахункову модель. Алгоритми аналізу чутливості убудовані в спеціальні скінчено-елементні програми і є досить складними для експлуатації.

Параметрична оптимізація більше відповідає потребам інженерних задач. Тут пошук виробляється в обмеженому просторі, границі для параметрів можуть бути призначені виходячи із практичних міркувань, та й наступне припасування розмірів до нормального ряду чисел, як правило, тільки незначно погіршують проект. Основою для її широкого використання стали параметричні системи геометричного моделювання. Наприклад, SolidWorks, маючи відпрацьовані алгоритми опису й зміни форми, інструменти конфігурацій, апарат рівнянь, процедури контролю геометричної реалізованості, дозволив природно зв'язати з ним засоби оптимізації COSMOSWorks. При цьому розміри є змінними проектування.

Ще одна обставина, виявилася принциповою для об'єднання методів чисельного аналізу й оптимізації, - це розвиток препроцесорів у програмах САЕ. Препроцесору доручається задача автоматизованої побудови сітки, а також реалізації граничних умов. Крім того, продуктивність як програмних, так й апаратних засобів на сьогодні така, що методи чисельного аналізу можуть використовуватися разом з алгоритмами оптимізації, у той час як раніше використовувалися, в основному, 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:

$$x_i^{(L)} < x_i \leq x_i^{(U)}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N.$$

за умови дотримання обмежень-нерівностей:

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

Слово "умовна" у назві задачі позначає, що на змінні проектування накладені якісь обмеження. Якщо обмежень, у тому числі й на діапазон змінних величин проектування, немає, то оптимізація називається *безумовною*.

У межах припустимої області функція може мати декілька мінімумів. Той мінімум, де функція має найменше значення називається *глобальним*. Інші мінімуми є *локальними*.

Спроба задати їх у програмі істотно ускладнює як сам алгоритм, так і процес його експлуатації. Тому цей тип обмежень намагаються виключити, наприклад, перетворенням задачі зі зменшенням числа незалежних змінних проектування.

Відомо велика кількість алгоритмів рішення задачі умовної оптимізації. Для цільової функції з лінійними або нелінійними обмеженнями абсолютна більшість із них входить у дві групи: це *методи прямого пошуку* (розглянемо тільки цей різновид як найбільш актуальну для інженерних розрахунків) і процедури, що використовують похідні. Незважаючи на не занадто високу в порівнянні із градієнтними алгоритмами ефективність при рішенні модельних задач, вони виявляються найбільш практичними для використання разом з алгоритмами чисельного аналізу, наприклад, методом скінчених елементів. Справа в тому, що результати, що одержуються МСЕ й іншими сітковими процедурами: напруги, переміщення, власні частоти, величини критичної сили й т. д. приведуть до негладкості або, більше того, розривності як цільової функції, так й обмежень. Обмеження можуть накладатися не тільки на геометричні параметри, але і на компоненти напруг, переміщень або на критичні сили, тобто те, що прямо або побічно пов'язане з результатами. Негладкість або розривність можуть бути результатом особливостей формулювання задачі оптимізації або ж бути наслідком властивостей фізичної моделі. Також при використанні чисельних методів виникає проблема неоднозначності й локальної нестійкості рішення.

Це значить, що мала зміна параметрів (геометрії моделі, настроювань сітки, вирішувачей і т. д.) приводить до результату, "істотно" відмінному від вихідного варіанта. У зв'язку із цим процес обчислення похідних цільової функції й обмежень по

змінним проектування є вкрай чутливим до особливостей задачі й, більш того, стає залежним від особливостей дослідника (скільки дослідників, стільки й варіантів сітки кінцевих елементів, стільки й результатів). Домогтися збіжності в таких обставинах дуже важко й, як наслідок, застосування градієнтних методів в оптимізаційних процедурах як у сенсі програмування, так і при експлуатації, є свого роду мистецтвом.

Методи прямого пошуку в меншому ступені чутливі до локальної негладкості й разривності цільової функції й обмежень. Тому висновок наступний. Удосконалені алгоритми, якщо використовувати їх для рішення строго обкресленого кола задач, гіпотетично більше продуктивні, вони також засновані на строгих критеріях оптимальності й дозволяють одержати "точне" рішення. Однак є ймовірність, що, у силу ряду обставин, процедура, якщо нею користуватися спільно із МКЕ або спорідненим вирішувачем, не дасть правильного результату. При цьому методи, що не вимагають обчислення похідних, дозволяють одержати, можливо і не оптимальний, але "кращий" у порівнянні з вихідним варіантом. Ступінь "поліпшення" залежить як від математичної основи алгоритму, так і від дослідника, що управляє процесом.

Неабияка частина алгоритмів умовної оптимізації базується на методах безумовної оптимізації. Як правило, для цього використовується заміна задачі. У цільову функцію вводиться добавка, що характеризує "ступінь" порушення обмежень. Ці алгоритми одержали назву *методів бар'єрних і штрафних функцій*. У першому випадку збільшення функції відбувається при наближенні до обмеження зсередини припустимої області, досягаючи на активному обмеженні нескінченної величини. У другому варіанті усередині й на границі припустимої області "добавка" дорівнює нулю, а потім, при виході за кордон припустимої зони, вона починає зростати. Для завдань із потенційно негладкою цільовою функцією й нелінійними обмеженнями найбільш ефективні *недиференційовувані штрафні функції*. Перший варіант: стала штрафна функція, що є, по суті, нескінченим бар'єром. При спробі влучення пробної точки в неприпустиму область функція приймає "нескінченне" значення, після чого приймається рішення про те, як діяти далі. Недоліком цього алгоритму є неможливість "участі" неприпустимих точок у

наступному аналізі й, відповідно, схильність алгоритмів до зациклення, якщо мінімум лежить на границі.

Другий варіант - використання абсолютної функції штрафу. По суті, даний вид штрафу - це сума абсолютних величин відхилу порушених обмежень. Вираження 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.

Природним є питання, який параметр штрафу потрібно використати. Теоретично він повинен залежати від поведінки вихідної цільової функції. Якщо, наприклад, вона "швидко" убуває в точці на лінії обмеження, то "малий" штраф не зможе компенсувати це зменшення, і програма продовжить пошук за межами припустимої області. Якщо ж штраф "занадто" великий, то виникають проблеми, властиві абсолютним штрафам. Таким чином, використання методів прямого пошуку вкупі із зовнішніми штрафними функціями також пов'язане з певним суб'єктивізмом, а одержувані результати не завжди відповідають очікуванням. Наприклад, можна припустити, що в основі модуля оптимізації *COSMOSWorks*, лежить описаний далі алгоритм. Тому в ситуаціях, коли виявлений програмою умовний оптимум лежить на одному або декількох обмеженнях, можливий "невеликий" вихід за межі припустимої області.

#### 4.2.2.3. Алгоритм методу комплексів

Розглянемо алгоритм комплексів (він ще відомий як *метод багатогранника*) на основі задачі умовної оптимізації переробленої відповідно до оптимізації безумовної за допомогою алгоритму абсолютної штрафної функції. Зміст методу в тім, що на базі деякої вихідної точки, що повинна бути припустимою, методом випадкового пошуку будуються ще декілька точок, так, щоб їхнє число дорівнювало числу варіюваних параметрів плюс один. У

просторі точки утворюють багатогранник. Серед всіх вершин виділяється найгірша (модифікована цільова функція, з урахуванням штрафу, має максимальне значення). Після цього нова пробна точка шукається відбиттям найгіршої щодо центра ваги інших. Для цього використовується коефіцієнт відбиття  $a$ , який традиційно береться рівним 1,3. Якщо пробна вершина порушує обмеження, накладені на інтервали вимірюваних змінних, то вона визначається як найближча до центра ваги інших вершин обмеження. Якщо й після цього вона порушує яке-небудь інше обмеження, то коефіцієнт відбиття зменшується у два рази. Так само коефіцієнт відбиття зменшується, якщо нова пробна точка залишається гіршою за ті, які залишилися від попередньої ітерації. У ході роботи відбувається зменшення розмірів комплексу, а також його деформування. Зокрема, тривала взаємодія з обмеженнями здатна приводити до втрати комплексом розмірності й, як наслідок, до неможливості просуватися в "перспективних" напрямках після того, як певна частина шляху уздовж активного обмеження пройдена, а обмеження "викривилося".

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  $x_i^p$  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  $F_{\max} = f(x^R)$ .

2. Знайти центр ваги  $X$  інших точок і нову пробну точку:

$$x^m = X + \alpha \cdot (X - x^R).$$

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  $x_i^m < x_i^{(L)}$ , покласти  $x_i^m < x_i^{(L)}$ , якщо  $x_i^m > x_i^{(L)}$ , 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  $F = \frac{1}{P} \sum_p f(x^p)$  і  $X = \frac{1}{P} \sum_p x^p$ .

2. Якщо  $\sum_p (f(x^p) - F) \leq \varepsilon$  і  $\sum_p (x^p - X) \leq \delta$  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

$$f(x^w) = \min f(x^p),$$

і привласнити змінній  $F_{\min} = f(x^w)$ ;

- 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 напрямком вважається "вдалим", після чого варто додатково визначити багатогранник;

- знайти "поліпшену" пробну точку  $x^e = X + \beta(x^R - X)$ , де  $\beta (\beta > 1)$  - коефіцієнт розтягування;

- якщо  $f(x^e) < f(x^m)$ , т. е. розтягування увінчалось успіхом, 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 реалізації описаного алгоритму, наприклад, в *COSMOSWorks*, є "чорними ящиками", а документація не містить ніякої інформації про методичні питання, що супроводжує ці алгоритми.

Наведемо алгоритм об'єднання умовної оптимізації й розрахункової програми в прикладному пакеті, на прикладі *COSMOSWorks*.

*Крок 1.* Створити геометричну модель *SolidWorks*.

Система розмірів повинна бути сформована так, щоб ті, які будуть змінними проектування, були керуючими. При наявності рівнянь простежити, щоб не відбувалося зменшення числа незалежних розмірів, які увійдуть до числа змінних проектування. Перевірити можливість перебудування моделі при зміні кожного із цих розмірів.

*Крок 2.* Створити розрахункову модель *COSMOSWorks*, що містить необхідне число *вправ*. Одне з них буде "джерелом"

цільової функції, інші нададуть інформацію для обмежень (при цьому обмеження можуть породжуватися результатами першої вправи).

Перевірити можливість побудови сітки для початкового варіанта геометрії, а також при зміні розмірів, які будуть асоціюватися зі змінними проектування.

*Крок 3.* Виконати розрахунок всіх *вправ*, які будуть задіяні в оптимізаційному розрахунку для геометрії, що відповідає початковому проекту.

Відобразити результати *вправ*, які будуть пов'язані з обмеженнями. Оцінити гіпотетичні інтервали їхньої зміни.

*Крок 4.* Створити *вправи* з типом "Оптимізація".

1. Визначити цільову функцію.
2. Призначити змінні проектування із числа параметризованих розмірів геометричної моделі.

3. Визначити інтервали змінення змінних проектування. Простежити, щоб початкова точка перебувала усередині відповідних інтервалів. Не рекомендується розташовувати вихідну точку на границі припустимої області.

4. Сформулювати обмеження, що вимагають виконання *вправ*, зробивши це так, щоб у початковій точці всі вони були неактивні. Як й у попередньому пункті, небажано, щоб початковий проект лежав на одному або декількох обмеженнях.

5. Задати параметри, що визначають процес закінчення обчислень. Призначити реалістичну величину максимального числа ітерацій.

*Крок 5.* Виконання оптимізаційного циклу.

1. Якщо цикл виконується перший раз, то перехід до пункту 7 даного кроку.

2. Відновлення геометрії й перебудування сітки.

3. Виконання всіх *вправ*, які беруть участь у формуванні обмежень і розрахунку цільової функції.

4. Виділення активних обмежень, розрахунок відхилень активних обмежень.

5. Розрахунок цільової функції.

6. Якщо проект припустимий і збіжність досягнута, то перехід до кроку 6.

7. Виконання прогнозу нових значень змінних проектування.

8. Перехід до пункту 2 даного кроку.

*Крок б.* Одержання поліпшеного проекту. Кінець оптимізаційного циклу.

Використовуючи графіки залежності змінних проектування, цільової функції й обмежень від номера ітерації, криві тренда (графіки залежності цільової функції від змінних проектування), а також здоровий глузд, оцінити, чи є варіант конструкції умовно-оптимальним або ж зупинка алгоритму було викликано іншими причинами.

Даний алгоритм є гранично схематичним щодо конкретних програмних реалізацій. Наприклад, питання про задоволення обмежень розглядається вже після того, як була побудована сітка, виконано розрахунки й одержано необхідні результати. У той же час частина обмежень, накладених на змінні проектування або їхні комбінації, не вимагає згаданих дій. Час на виконання цих операцій несуттєвий. Тому виконувати подальші операції, що вимагають у сотні й тисячі разів більше ресурсів, нерационально й краще відразу почати пошук кращого варіанта. Непогана особливість *COSMOSWorks* полягає в тому, що для формування обмежень можуть бути використані результати декількох аналізів як одного типу, так і різних видів.

На закінчення про можливі проблеми при роботі в *COSMOSWorks*. В інженерній діяльності, задача оптимізації традиційно формулюється у двох принципових варіантах. Перший - мінімізувати масу при обмеженнях на максимальні напруження, деформації, переміщення, мінімальні власні частоти або мінімальні навантаження втрати стійкості й, зрозуміло, параметри геометрії. У цьому аспекті алгоритм оптимізації пакета *COSMOSWorks* більш-менш спроможний впоратися з поставленою задачею. Але є ще один фундаментальний клас задач, де потрібно мінімізувати максимальні напруження (що діагностуються, зрозуміло, у повному обсязі моделі) при обмеженнях по масі й на які-небудь розміри. Аналогічно формулюється задача, де критерієм виступають деформації й, досить часто, - переміщення.

Рішення цієї проблеми в *COSMOSWorks*, якщо не використовувати певних непрямих й не завжди відтворених прийомів, неможливо. Це при тім, що програма надає можливість управляти резонансними характеристиками й навантаженнями

втрати стійкості. Однак накладати обмеження на масу або об'єм не можна, ні при яких умовах.

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

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

#### **4.3.1. Призначення пакета**

*COSMOSWorks* – програмний додаток до *SolidWorks*, призначений для рішення задач механіки деформованого твердого тіла методом скінчених елементів. Опис програми буде досить коротким. Це пов'язане з тим, що є досить докладний посібник [5].

Продукт розроблений фірмою *Structural Research and Analysis Corporation (SRAC, США)*, що у даний момент є підрозділом фірми *SolidWorks*. Для формування розрахункової моделі програма використовує геометричну модель деталі або складальної одиниці в *SolidWorks*. Інтеграція з *SolidWorks* дає можливість мінімізувати операції, зв'язані зі специфічними особливостями скінчено-елементної апроксимації. Призначення граничних умов виконується в прив'язці до геометричної моделі. Такими ж особливостями володіють і процедури подання результатів. Розвиток програми відбувається як у напрямку збільшення обчислювальних можливостей, так й, у значній мірі, за рахунок розширення функціональності, пов'язаної з імітацією розрахункових ситуацій, що виникають у повсякденній інженерній практиці. До теперішнього часу утворився "пакет" із трьох продуктів: *COSMOSWorks*, *COSMOSFloWorks* й *COSMOSMotion*. У цьому зв'язку *COSMOSWorks* здатний приймати результати аерогідродинамічного або теплового розрахунків, виконаних в *COSMOSFloWorks*, а також навантаження руху, отримані в результаті динамічного аналізу в *COSMOSMotion*.

*COSMOSWorks* виступає у ролі інструменту "інженерного" аналізу, тобто передбачається, що для фахівця-розраховувача потрібні більш професійні засоби. Однак, як показує практика, що переважна частина інженерних задач, що вирішується чисельними методами, може бути вирішена за допомогою даної програми. Раціональний інтерфейс і розумно обмежена функціональність дають інженерові можливість зосередитися на проектуванні, не

відволікаючись на властиві "універсальним" пакетам подробиці. Як правило, підставою створення вдалої конструкції є кваліфікація виконавця, а розрахункові програми використовуються для перевірки того, що вийшло, а також поставляють матеріал для подальших проб.

#### 4.3.2. Теоретична база

*COSMOSWorks* побудований на базі методу скінчених елементів. Теоретичні основи цього методу викладено у розд. 4.2. У даному розділі представимо особливості його реалізації в даній програмі. Вони відносяться до питань, які досить часто виникають на практиці:

1) В *COSMOSWorks* використовуються два типи скінчених елементів: об'ємні ізопараметричні тетраедри й трикутні елементи оболонки. Обоє ці типи можуть мати лінійне або параболічне поле переміщень (постійну деформацію або лінійне поле деформацій). Тетраедри містять, відповідно, 4 або 10 вузлів, а оболонки - 3 або 6. Ніяких інших типів елементів: балок, стрижнів, контактних елементів і т. д. у програмі немає.

2) Програма не допускає співіснування в одній моделі твердотільних й оболонкових скінчених елементів. Це серйозне, у принципі, обмеження у якійсь мірі компенсується тим, що в універсальних пакетах МСЕ методика сполучення елементів різних типів також неоднозначна.

3) Контактні скінчені елементи, у явному виді, у програмі відсутні. На основі непрямих спостережень можна затверджувати, що врахування відповідних граничних умов здійснюється зміною глобальної матриці жорсткості системи.

4) Інші типи кінематичних граничних умов реалізуються безпосередньою зміною матриці жорсткості системи (у ранніх версіях програми для цього використовувалися штрафні функції - "абсолютно" жорсткі допоміжні елементи, що приводило до помилок програми).

5) Сполучення в межах однієї зборки контактних граничних умов типу входу в контакт і виходу з контакту можливо виконати, але одержувані результати іноді неадекватні ситуації.

б) Для розрахунку складальних одиниць у програмі реалізовані граничні умови, такі як *Дистанційне навантаження*

(Remote Load), *Точно* (Rigid), *Шпилька* (Pin). Реалізація цих умов припускає такі зміни матриці жорсткості системи, які фактично приводять до появи в моделі абсолютно жорсткого об'єкта. Як наслідок, у місці, де цей об'єкт взаємодіє з "реальними" деталями складальної одиниці (фактично, у зоні прикладення описаних граничних умов), можлива поява теоретично нескінченних деформацій (напружень). На практиці це виражається у відсутності збіжності рішення при ущільненні сітки й, швидше за все, у некоректності результатів.

7) В *COSMOSWorks* є *p*-адаптивний метод побудови сітки скінчених елементів. Це значить, що в зонах з високим градієнтом енергії деформації програма збільшує порядок полінома, що апроксимує поле переміщень у скінченому елементі. При некоректній постановці кінематичних граничних умов можлива поява особливостей (теоретично нескінченних деформацій і напружень). Застосування даної опції для таких розрахункових моделей призводить до абсурдних результатів.

8) У рамках пружного аналізу можливе використання ортотропних матеріалів. Доступні ортогонально-ортотропні й, як окремих їхніх випадок, трансверсально-ізотропні матеріали. Можливе визначення циліндричної ортотропії. Криволінійна ортотропія відсутня. Присвоєння властивостей анізотропії неплоским оболонкам формально можливо, але результат, що виходить, незадовільний (для версій програми до 2005 року).

9) При оцінці міцності зборок за допомогою функції *COSMOSWorks* *Перевірка міцності* (Design Check Wizard) для всіх матеріалів використовується той самий тип критерію міцності. Таким чином, застосування цієї функції для аналізу зборок, що містять деталі з крихких і в'язких матеріалів, визве проблеми.

10) Убудований в *COSMOSWorks* модуль оптимізації, як передбачається, засновано на методі прямого пошуку із зовнішньою штрафною функцією (більш докладно він описаний у розд. 4.2). Це робить імовірною збіжність до точки, що перебуває поза припустимою областю поблизу одного або декількох обмежень. Оптимізація за критерієм мінімуму/максимуму еквівалентної напруги в *COSMOSWorks* неможлива. Оскільки, як описано вище (неможливо одночасного використовувати різні критерії міцності), оптимізація зборок, у яких деталі виготовлено з

різних типів матеріалів, при обмеженнях на припустимі еквівалентні напруги визве проблеми.

#### 4.3.3. Інтерфейс

*COSMOSWorks* має стандартний інтерфейс програми *SolidWorks*. Після активізації *COSMOSWorks* у меню *SolidWorks* виникає відповідний пункт в меню програми (рис. 3). Праворуч у вікні *SolidWorks* з'являється *Менеджер COSMOSWorks*, що представляє собою дерево. У ньому присутні позиції, що характеризують проект у цілому (піктограма з назвою деталі або зборки й піктограма *Параметри* (Parameters)), а також піктограми із *Вправами* (Studies), що з'являються після їхнього створення. Вправи є гілками, що поєднують інформацію про деякий розрахунок: матеріали, сітка, граничні умови, результати, звіти. Кожній піктограмі відповідає контекстне меню, вміст якого змінюється залежно від поточного стану розрахункової моделі.

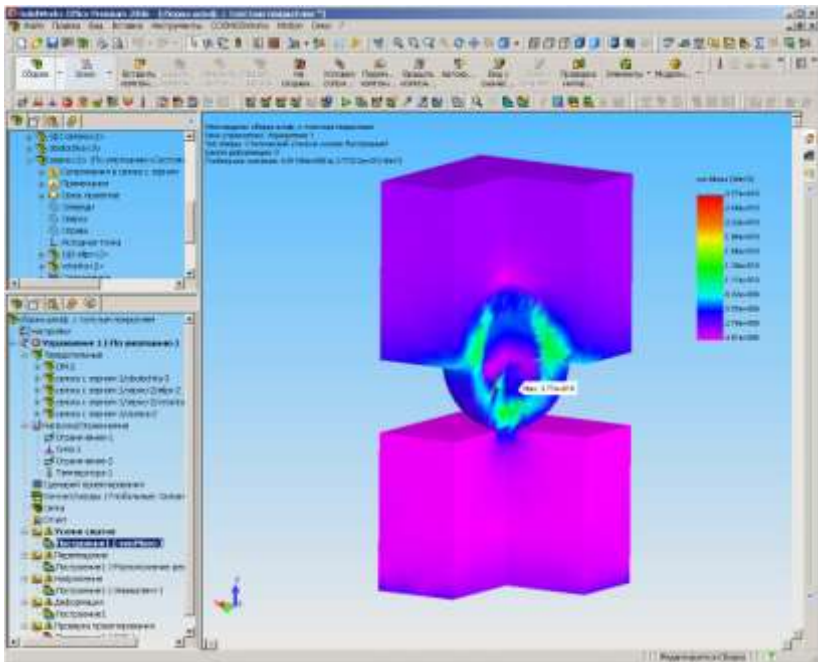


Рисунок 3 – Робота з пакетом *COSMOSWorks* в програмі *SolidWorks*

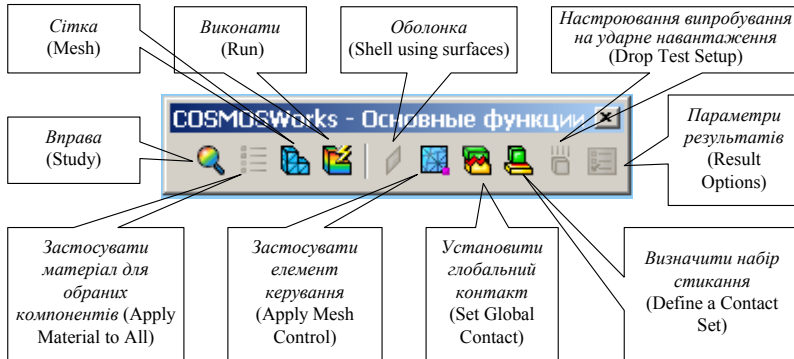


Рисунок 4 - Панель *Основні функції*

Розглянемо більш докладно панелі інструментів *COSMOSWorks* (рис. 4 - 10).

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Основні функції* (рис. 4).

*Вправа.* Створення нової *Вправи*, зміна параметрів або видалення наявного.

*Застосувати матеріал до всіх.* Призначення матеріалу або зміна характеристик уже призначеного для обраних елементів папки *Твердотільні (Solids)* або *Оболонки (Shells)*.

*Сітка.* Скінчено-елементна розбивка моделі стосовно до активної *Вправи (Study)*. Перед побудовою сітки рекомендується перевірити *Настроювання (Mesh Preferences)*, *Елементи керування сіткою (Mesh Control)*, *Контакт/Зазори (Contact Conditions)* (останнє - тільки для *Вправи* з типом аналізу *Статичний*).

*Виконати.* Розрахунок для активної *Вправи*.

*Оболонка.* Побудова сітки на базі виділених граней або поверхонь. Допускається мати в списку вибору обидва типи об'єктів, однак сітка буде, швидше за все, незшитою.

*Застосувати елемент керування.* Призначення для об'єктів деталі або зборки параметрів щільності сітки, пов'язаних з вершинами, пругами, гранями або - для зборки - деталями. У збірці щільність можна призначити ізолювано для деталі або прив'язувати її до щільності, що програма використала б для ізолюваної деталі. Керування щільністю залежно від напрямку не



допускається.

*Установити глобальний контакт.* Призначення контактних граничних умов "загальноприйняті". Допускається спільне переміщення, незалежне переміщення й контакт у первісному стані з можливістю відриву. Останній тип граничних умов варто використовувати, якщо деталі можуть прослизати. Команда доступна тільки при роботі в збірці для лінійного пружного аналізу або для рішення задач із фізичною нелінійністю матеріалів. Вона також частково функціональна при тепловому розрахунку. Для розрахунків на стійкість, при виділенні власних частот й у випадку нелінійного аналізу допускається тільки спільне переміщення деталей.

*Визначити набір стикання.* Призначення для пар взаємодіючих об'єктів, а також для виділених деталей контактних граничних умов відмінних від загальноприйнятих. На додаток до граничних умов, названих у попередньому пункті, можна для пар граней призначити умову входження в контакт.

*Настроювання випробування на ударне навантаження.* Визначення параметрів моделювання процесу падіння. Допускається вибір висоти падіння або швидкості. Призначається орієнтація площини, на яку падає об'єкт і коефіцієнт тертя. Півпростір, на яке "падає" модель, вважається абсолютно жстким. Аналіз супроводжується рішенням контактного завдання зі змінною границею.

*Параметри результатів.* Настроювання параметрів відображення результатів обраної *Вправи*. Команда доступна тільки після його розрахунку.

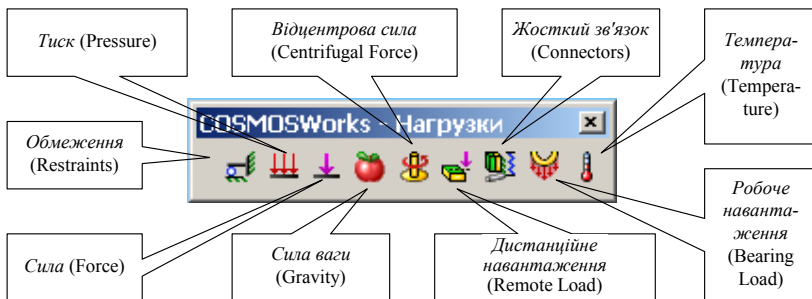


Рисунок 5 - Панель *Навантаження*

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Навантаження*.

*Обмеження*. Визначення граничних умов на обраних елементах моделі для активної механічної (типи аналізу *Статичний, Власні частоти, Стійкість, Нелінійний*) *Вправи*.

*Тиск*. Прикладення тиску до обраних граней для активної механічної *Вправи*.

*Сила*. Прикладення сили, крутильний або згинальний момент на обрані об'єкти моделі для активної механічної *Вправи*. Задане зусилля прикладається на кожне з обраних об'єктів.

*Сила ваги*. Завдання гравітаційних (ширше - інерційних) навантажень для активної механічної *Вправи*.

*Відцентрова сила*. Завдання відцентрової сили для активної механічної *Вправи*.

*Дистанційне навантаження*. Прикладення віддалених навантажень для активної механічної *Вправи*.

*Жорсткий зв'язок*. Уведення віртуальних об'єктів, що імітують з'єднувальні елементи.

- *Точно (Rigid)* - уведення абсолютно жорсткого тіла, що з'єднує грані двох деталей.
- *Пружина (Spring)* - включення "розподіленої" пружини розтягання-стиску або зрушення, можливо попередньо напруженої, між плоскими гранями двох деталей.
- *Шпилька (Pin)* - включення абсолютно жорсткого штифта, що з'єднує концентричні циліндричні отвори двох деталей. Штифт може забезпечувати поворот або осьовий зсув деталей із призначеною жорсткістю.
- *Пружна опора (Elastic Support)* - імітація податливої опори, що обмежує рухливість заданих граней деталі (деталей). Опора може мати нормальну й зсувну жорсткість.
- *Болт (Bolt)* - уведення податливого об'єкта, що відтворює дію болта з попереднім затягуванням. Остання задається осьовою силою або крутильним моментом. В останньому випадку потрібен коефіцієнт тертя для розрахунку сили. Болт може сполучатися із деталлю, що з'єднується, через віртуальне різьблення й (або) через імітацію шайби.

*Робоче навантаження*. Прикладання контактних опорних

навантажень на обрані грані для активної механічної *Вправи*.

*Температура*. Визначення температури на обраних об'єктах для активної *Вправи* з типом аналізу *Тепловий* або *Статичний*.

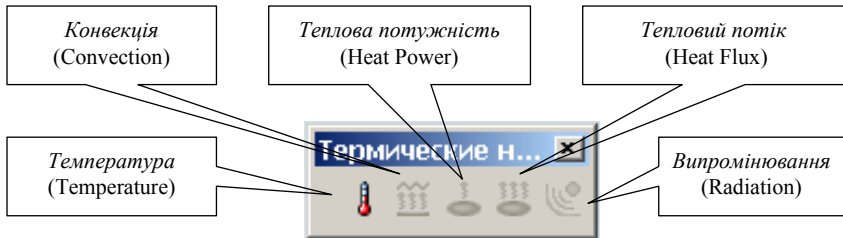


Рисунок 6 - Панель *Термічні навантаження*

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Термічні навантаження* (рис. 6).

*Температура*. Призначення температури на обрані об'єкти для активної *Вправи* з типом аналізу *Тепловий* або *Статичний*.

*Конвекція*. Прикладення конвекції на обрані грані для активної *Вправи* з типом аналізу *Тепловий*.

*Тепловий потік*. Прикладення теплового потоку на обрані грані для активної *Вправи* з типом аналізу *Тепловий*.

*Теплова потужність*. Прикладення теплової потужності на обраних гранях для активної *Вправи* з типом аналізу *Тепловий*.

*Випромінювання*. Визначення випромінювання обраними гранями для активної *Вправи* з типом аналізу *Тепловий*.

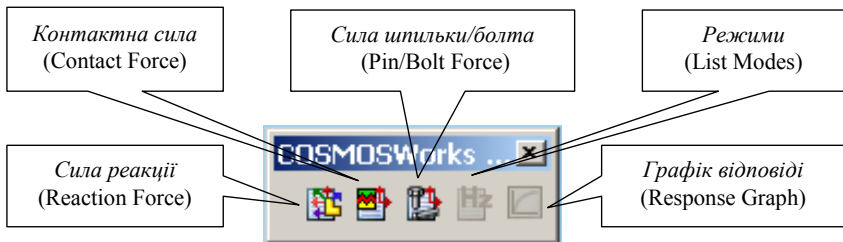


Рисунок 7 - Панель *Показати інструменти результатів*

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Показати інструменти результатів* (рис. 7).

*Сила реакції*. Виведення інтегральної величини зусилля,

прикладеного до деякого геометричного елемента деталі, деталі в зборці або зборки в цілому.

**Контактна сила.** Виведення чисельних характеристик контактної зусилля між деталями в зборці на поверхні зіткнення. Виводиться також величина сили, викликані тертям.

**Сила шпильки/болта.** Виведення осьового й зсувного компонентів зусилля, що виникає в болтовому з'єднанні, а також крутильного моменту. Компоненти, викликані попереднім натягом, також включаються у відображувані значення.

**Режими.** Відображення величин власних частот для розрахунку на резонанс.

**Графік відповіді.** Формування кривої відгуку в нелінійній задачі.



Рисунок 8 - Панель *Інструменти результатів*

Нижче описані функціональні можливості команд панелі *Інструменти результатів* (мал. 8).

**Помічник для перевірки проекту.** Активізація *Помічника* для перевірки проекту для активної статичної *Вправи*. Він здійснює порівняння результатів розрахунку напруг за обраним критерієм міцності.

**Зусилля стиску.** Візуалізація діаграм напруг: компонентів щодо глобальної або локальної системи координат, еквівалентних напруг за Мізесом, а також оцінки помилки обчислення напруг.

**Переміщення.** Візуалізація діаграм переміщень щодо глобальної або локальної системи координат, сили реакції і її компонентів.

**Напруження.** Візуалізація діаграм деформації щодо глобальної або локальної системи координат, еквівалентних

деформацій, а також щільності енергії деформування.

*Термічна.* Візуалізація діаграм температур, градієнтів температури щодо глобальної або локальної системи координат, теплового потоку і його градієнтів.

*Звіт.* Генерація звіту, що містить результати поточної активної *Вправи*.

*Анімувати.* Анімація досліджуваної моделі з результатами.

*Обмеження перетину або ISO.* Активізація вікна *Відсікання*. Воно призначено для керування перерізами активного виду або побудови ізоповерхні.

*Параметри.* Настроювання параметрів відображення активної діаграми з результатами: способу візуалізації сітки або границь, деталей у зборці, масштабу деформованого виду й т. д.

*Зондування.* Виведення числового значення відображуваного результату в найближчому до зазначеної крапки на поверхні моделі або в перерізі.

*Обраний список.* Виведення числових значень відображуваного результату у вузлах, що належать заданим (одному або декільком) об'єктам моделі. Це інструмент для формування епюр полів у звичному для опору матеріалів виді.

*Зберегти як.* Запис активної моделі у файл.

*Відобразити/сховати сітку.* Якщо візуалізувати які-небудь результати, то використання цієї функції призведе до відображення "нормального" виду моделі *SolidWorks*.

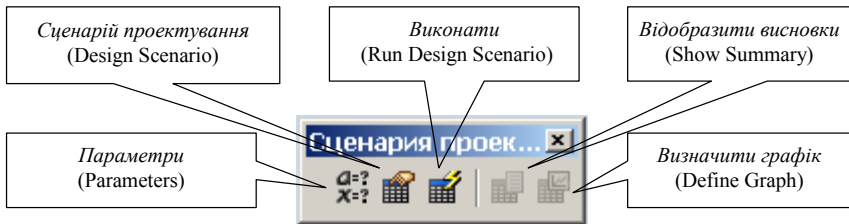


Рисунок 9 - Панель *Сценарій проєктування*

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*.

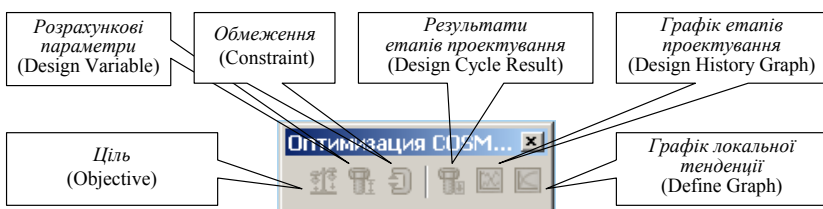


Рисунок 10 - Панель *Оптимізація*

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

Програма *COSMOSWorks* запозичила математику пре- і

постпроцесора, алгоритми формування матриці жорсткості й лінійні вирішувачі у універсальній скінчено-елементної програми COSMOSM. Розрахункова функціональність споконвічно була обмежена рамками тетрадральних скінчених елементів стосовно до єдиної деталі або вузла з монолітним зв'язком деталей. Подальший розвиток програми відбувався вже у зв'язку з *SolidWorks* і полягало у впровадженні функцій, необхідних для типових розрахункових ситуацій.

#### 4.3.4.1. Базові можливості аналізу

*COSMOSWorks* дозволяє виконувати наступні види моделювання:

- статичний аналіз у пружній постановці з розрахунком окремих деталей по просторовій або оболонковій моделі, а також зборок у тривимірній постановці з урахуванням взаємодії деталей;

- розрахунок власних частот і відповідних їм форм для деталей у твердотілому або оболонковому поданні, а також зборок з нерухомими деталями;

- розрахунок величин критичних навантажень втрати стійкості й відповідних їм форм для деталей у твердотілому або оболонковому поданні, а також зборок з нерухомими деталями;

- тепловий розрахунок з урахуванням явищ теплопровідності, конвекції, випромінювання, але без урахування руху середовищ;

- термпружний аналіз на базі результатів теплового розрахунку;

- параметрична оптимізація за критерієм мінімізації/максимізації маси, об'єму, власних частот і критичної сили;

- імітація деформування конструкції з урахуванням фізичної й геометричної нелінійності, а також у вигляді змінення навантажень і температури в часі;

- моделювання ефекту падіння конструкції на жорстку поверхню;

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

Всі ці типи аналізу можуть бути пов'язані з однієї й тією же моделлю виробу, створеної в *SolidWorks*.

#### 4.3.4.2. Послідовність розрахунку

*COSMOSWorks* вимагає дотримання алгоритму методу скінчених елементів, надаючи усередині кожного етапу певну волю в послідовності кроків підготовки моделі й візуального аналізу результатів (розрахунок у пружній постановці):

1) Створення аналізу певного типу й визначення його настроювань.

2) Заповнення, якщо необхідно, таблиці параметрів, що визначає набір величин, які можуть змінюватися в ході розрахунку.

3) Підготовка початкових (вихідних) даних усередині заданого аналізу: призначення матеріалу деталі або деталям, кінематичних і статичних граничних умов; створення сітки.

4) Зв'язування, якщо буде потреба, параметрів з таблиці з параметрами відповідних аналізів.

5) Виконання розрахунку.

6) Обробка результатів: створення необхідних діаграм; аналіз діаграм; експорт результатів.

Процедура оптимізації базується на результатах розрахунків у лінійній постановці (статичного аналізу, розрахунку на власні частоти й на стійкість).

#### 4.3.4.3. Властивості матеріалів

Лінійний розрахунок може виконуватися з використанням ізотропних й ортотропних (ортогонально й циліндрично) матеріалів. Розрахунок на падіння може бути виконаний для деталей із пластичних матеріалів з ізотропним зміцненням. У межах однієї деталі може бути призначено тільки єдиний матеріал, для кожної з деталей зборки може бути надано довільний матеріал. В оболонковій моделі при її створенні на базі поверхонь або граней матеріал (так само як і товщина) призначається незалежно для кожної із граней оболонки. Якщо сітка оболонкових елементів будується на базі серединних поверхонь, то матеріал привласнюється деталі в цілому.

#### 4.3.4.4. Граничні умови

*COSMOSWorks* підтримує різноманітні типи граничних умов. Для розрахунків у пружній постановці граничні умови не змінюються в часі. У нестационарній тепловій задачі можуть імітуватися теплові датчики, що управляють перемиканням джерел



тепла.

У програмі передбачені імітатори з'єднань, пружної основи, зв'язку між недотичними деталями зборки, а також граничні умови, що діють на віддаленні.

#### 4.3.4.5. Генерація сітки

Побудова сітки здійснюється автоматично без можливості наступного коректування. Передбачено інструменти керування щільністю сітки, однак призначення змінної щільності залежно від напрямку неможливо. Адаптивна сітка припускає змінення порядку скінчених елементів у зонах значного градієнта густини енергії деформування.

Створення сітки стосовно до контактних задач відбувається автоматично після призначення користувачем типу контактних граничних умов.

#### 4.3.4.6. Контактна задача

Розрахункова модель зборки в статичному аналізі може містити контактні граничні умови наступних типів:

- спільне переміщення;
- незалежне переміщення;
- проковзування й вихід з контакту;
- вхід у контакт;
- наявність контакту для малих зазорів;
- імітацію гарячої посадки для циліндричних тіл.

У межах одного аналізу для зборки можуть співіснувати контактні граничні умови різних типів.

#### 4.3.4.7. Додаткові можливості

Програма пропонує різноманітні способи відображення діаграм результатів з використанням: кольору, ізоліній, перерізів, деформованого виду, з накладенням на первісну модель, у розчленованому стані для вузлів, одержання результатів у чисельному виді в конкретній точці й т. д.

*COSMOSWorks* може сприймати навантаження руху, одержані в розрахунках зборок за допомогою *COSMOSMotion*, і перетворювати їх в інерційні навантаження для окремих деталей. Також програма здатна імпортувати інформацію про розподіл температури й тиску з програми *COSMOSFloWorks*.

*COSMOSWorks* може експортувати інформацію про сітку й, у

деяких випадках, про граничні умови в універсальні скінчено-елементні пакети.

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

1. Перелічіть відомі інтегровані системи проектування виробів.

2. Що собою представляє CALS-технології? Які програмні пакети відносяться до CALS-технологій?

3. Перелічіть відомі програмні пакети, призначені для інженерних і науково-дослідних розрахунків, що забезпечують розробку технічних виробів.

4. Які класи задач вирішуються в САЕ-програмах?

5. Приведіть загальний алгоритм рішення задач із використанням САЕ пакетів.

6. Що собою представляє метод скінчених елементів? Поняття скінченого елемента?

7. Загальний алгоритм методу скінчених елементів і різні аспекти його реалізації.

8. Особливості реалізації методів оптимізації в пакетах для інженерного аналізу.

9. Приведіть алгоритм об'єднання умовної оптимізації й розрахункової програми в прикладному пакеті, на прикладі *COSMOSWorks*.

10. Можливості пакета *COSMOS* для виконання 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.

**Додаток 1.**  
**УНІВЕРСАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ**  
**ДИЗАЙНУ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ**

Розглянемо дану методику на прикладі проектування яхти [17].

Відповідно до методики, передбачається наступний план дій:

- аналіз розвитку маломірного флоту;
- історичний розвиток;
- загальні відомості, класифікація;
- ретроспектива;
- аналіз сучасного стану проблеми;
- аналоги;
- ринкові умови;
- конструкція, конструктивні матеріали і їхні властивості;
- характеристика структури виробництва;
- дослідження формотворних передумов;
- вибір дизайну-концепції (художньо-конструкторський проект);

проект);

- технічна характеристика обраних вузлів й агрегатів;
- опис компоновочного рішення;
- показники обраного конструкторського рішення;
- опис застосування розроблювального виробу.

Ця методика відображає основні правила системного проектування, що робить її універсальною.

Розглянемо більш докладно етап вибору дизайн-концепції.

Образ майбутнього виробу повинен відповідати призначенню предмета, тобто враховувати специфіку матеріалу, що передбачається для виробу, враховувати взаємодію виробу з передбачуваним навколишнім середовищем (у даному конкретному випадку форма повинна бути гідродинамічною, конструктивно міцною, бути стійкою до обростання, корозії, повинне передбачатися наявність рятувальних засобів й ергономічна житлова зона при дотриманні стандартів суднобудування й т. д.). Виходячи з таких міркувань, створюється композиція виробу, де розглядається послідовно від цілого до окремого. Спочатку робота починається з формування візуальної маси судна. Візуальна маса характеризується силою візуального

сприйняття людиною. Головний елемент композиції повинен володіти (у цьому випадку, але не завжди) максимальною візуальною масою. Тут набувають чинності закони асоціативної композиції - форма предмета в жодному разі не повинна нагадувати що-небудь конкретне. Абстракція - основна ознака стилю в дизайні. Сучасне формоутворення тяжіє до використання ідеально вивірених геометричних поверхонь природних кристалів, з'єднаних плавними скульптурними переходами. При цьому всі поверхні, що утворюють будь-які вироби, підрозділяються на поверхні 1-го порядку (плоска), 2-го порядку (має вигин в одній координатній площині) і 3-го порядку (наприклад куля). Складність форми яхти передбачає застосування поверхні 3-го порядку, при тім, що корпус виготовляється зі склопластику.

Незалежно від матеріалу форма яхти повинна бути динамічною й підлягати законам аеродинаміки. Взагалі, будь-які елементи варто розглядати, як сили стиску й розтягання, спрямовані по візуальних осях. Ступінь динамічності елемента характеризується спрямованістю візуальної маси по одній з осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Отже, ступінь динамічності дорівнює відношенню довжини до висоти або ширини. Величина ступеня динамічності досягає екстремальних значень у напрямках дій сил стиснення-розтягання. Наприклад, на вершинах трикутника. Напрямок, по якому ступінь динаміки максимальний - головна динамічна вісь. Динамічна вісь завжди проходить через центр візуальної маси об'єкта. Точка перетину динамічних осей - композиційний вузол. Порядок (значимість) композиційного вузла визначається кількістю перетину у ньому динамічних осей. Композиційні вузли й візуальні зв'язки між ними визначають предмет, його форму, де динамічна вісь - бісектриса кута, утвореного зв'язками, що з'єднують вузли. Динаміка завжди спрямована від елементів з великою візуальною масою до елементів з меншою візуальною масою або від відповідних частин в одному елементі. Отже, динаміка яхти спрямована прямо за курсом, а форма повинна динаміку підкреслювати.

Тепер розглянемо форму виробу. З урахуванням стратегії візуального сприйняття, всі предмети й графіка діляться на класи відповідно до своїх розмірів.

*Стратегія 1-го рівня. Розподіл предметів на класи, виходячи*

з їхніх розмірів.

*Клас А* - предмети, габарити яких лежать у межах від 0,1 до 1 мм (нижче класу А людина не озброєним оком не бачить). Це текстури, фактури.

*Клас В* - розміри від 1 до 10 мм - це букви, цифри, гвинти.

*Клас С* - габаритні розміри від 10 до 100 мм - це кнопки, ручки, надписи.

*Клас D* - від 100 до 1000 мм - це шафи, наприклад.

*Клас E* - від 1 до 10 м - це стіни, вікна, верстати.

*Клас F* - від 10 до 100 м - це екстер'єр будинків і споруджень.

*Клас G* - від 100 до 1000 м - це ландшафт (сади, греблі).

Людина не здатна бачити композиції 2-х рівнів одночасно: вони мають візуальну автономію. Але ознаки плавно змінюються від одного рівня до іншого, від вищого (цілого) до нижчого (частці). Наприклад, корпус яхти > суперграфіка на корпусі яхти > ілюмінатор, розташований у границях суперграфіки. Тому в ході проектування, переходячи від визначення цілої форми до визначення - розбивці (що не особливо бажано, але необхідно й обумовлюється рівнем розвитку нашої промисловості), треба стежити за тим, щоб всі елементи не тільки залишалися у своїх класах, але й були впорядковані. Це допоможе запобігти роздробленості форми як цілого й не дасть зламати композицію форм й їхніх частин.

*Стратегія 2-го рівня. Групування елементів.* Візуально елементи групуються, поєднуючи їх по загальних ознаках (за формою, кольором, орієнтацією, розміром, місцем розташування). Динаміку форми яхти можна підкреслити групою рівно спрямованих (з рівно спрямованою динамікою) частин форми яхти (корпуса, надбудови - це головні великі частини, що складають форму, не вважаючи щогли й капітанського містка, якщо він є). Створити цілісність допоможе також використання гармонічної кольорової гами.

*Стратегія 3-го рівня. Це перемикання уваги від елементів з більшою візуальною масою до елементів з меншою візуальною масою.* І цю особливість зорового сприйняття теж варто використовувати для виявлення цілісності форми - більша маса повинна підкоряти меншу, не давати їй домінувати на своєму тлі, коли порушується силуетність, і ми не бачимо цілого. Але менші

елементи повинні пожвавлювати форму, виділяючись, але не випадати із загальної композиції. Наприклад, мідні кнехти краще будуть виглядати на склопластиковому причальному брусі.

*Стратегія 4-го рівня. Це переключення уваги зліва праворуч, зверху вниз, від себе вдалину.* Це відбувається при першому знайомстві із предметом, коли не помічаються деталі, а сприймається весь образ. Тут важливо надати яхті тектонічності, шляхом роботи з матеріалами і конструкціями. До того ж тектоніка є основою композиції. Щоб не виглядало так, що якась частина не на своєму місці, зроблена з невідповідного для неї матеріалу або неправильно сконструйована.

*Стратегія 5-го рівня. Це рух погляду людини по динамічних осях.* Коли оцінюється динаміка форми й відповідність динаміки призначенню предмета.

*Стратегія 6-го рівня. Це фіксація уваги людини в композиційних центрах.* Весь предмет побачили, зафіксували, розглянули, тепер створюється його оцінка. Одна мить.... і людина оцінила предмет відповідно до свого смаку. Око людини асиметричне: ми бачимо більше ліворуч, чим праворуч і зверху, чим знизу. Верхня частина будь-якої композиції - головна, нижня - другорядна, ліва частина головніше правої. (Дотримання цих правил дуже добре помітно в шрифті). Це правило теж можна застосувати в проектуванні корпусу й надбудови.

*Правила компоновання.* Компоновання повинно виконуватися на основі модульної координатної сітки.

Елементи композиції розміщаються у вузлах модульної координатної сітки.

Візуальні групи елементів повинні мати просту геометричну форму (прямокутник, коло й т. д.).

Елементи й групи елементів не повинні мати різноспрямовані динамічні осі.

Елементи, однакові за формою, кольором, орієнтацією, місцю розташування, розміром, треба розміщати на ортогональних горизонталях і вертикалях.

В остаточному підсумку, ми одержуємо загальну динамічну форму з певними композиційними пріоритетами, тобто цільну композицію. В ідеалі, на цьому можна закінчити проектування, але тому що це не модель, а виріб, що буде збиратися на виробництві. І



оскільки на сьогодні немає таких технологій, які дозволяють робити цільні дешеві великогабаритні вироби, тому необхідно розбивати виріб на частини. На даному етапі проектування знадобиться поняття візуальної групи. Декомпозиція - розкладення композиції на візуальні групи, де візуальна група - це група елементів, що володіють однаковими ознаками (форма або розмір, або колір, або все разом). Важливо при цьому дотримати цілісності композиції в корпусі й надбудові (саме на ці головні частини, у даному проекті, ділимо форму яхти), тобто надати елементам візуальних груп однакові ознаки. У результаті чого наша форма не буде візуально розвалюватися.

Після визначення візуальних груп частин форми, необхідно виконати підпорядкування елементів груп з використанням таких способів:

- розміщенням відносно один одного;
- розміщенням елементів у композиційних центрах (на перетині візуальних осей);
- домінуванням елементів з більшою масою над елементами з меншою масою;
- шляхом поміщення груп елементів у границі (графічні - обвідка, об'ємні - опуклість, увігнутість, борозенка й т. д.);
- виділенням кольором (колірні групи).

Але недостатньо конструктивно або графічно зібрати елементи, їх треба ще впорядкувати. Всі ці заходи дозволяють зберегти лаконічність композиції (упорядкованість елементів).

Другорядні елементи композиції повинні лежати на динамічних осях головних стосовно них елементів.

Динамічні осі композиції повинні бути паралельні, перпендикулярні або розміщатися по ясно вираженому законі.

Необхідно віддавати перевагу простій структурі. Наприклад, що має в основі композиції, хрест, така структура найсильніша, що має виразний композиційний центр. У цьому випадку композиція найбільш стійка. Але хрест має один недолік: він однозначно є й домінантою (самою виразною частиною композиції), і головним композиційним центром, тобто подавляє всі інші побудови візуальних осей. Якщо ви хочете цього уникнути, потрібно використати хрест багаторазово, тоді він перестає домінувати, тому що коли в композиції безліч рівнозначних домінант, вони

автоматично переходять у розряд рапортного поля (фонового візерунка, не головного елемента по визначенню). Яскравим прикладом цього служать звичайні личаки (плетені з лика або іншого матеріалу селянське взуття), де сполучаються виразність фактури переплетення волокон з текстурою дерева, а домінантою є поглиблення для стопи, обмежене від поверхні ободком.

Автор методики запевняє, що гарну ідею можна взяти з народних ремесел. Тому що "народний дизайн" це самий ергономічний, життєвий і щиросердечний дизайн, тобто це ті якості, яких не вистачає промислового дизайну.

*Цілісність і тектоніка* - основа композиції. *Цілісність* досягається, по-перше, скороченням кількості візуальних груп, де доречно правило: "якщо можеш - забери, залиш тільки те, що працює на річ". По-друге, шляхом вирівнювання композиційних центрів елементів по осях  $x$ ,  $y$ . І, по-третє, шляхом накладення-перетинання або раціонального зближення контурів елементів, керуючись окоміром або принципом золотого перерізу.

Термін "золотий переріз" увів Леонардо да Вінчі й відомо нам, як ідеальний модуль складання пропорцій предмета. Золотий переріз (золота пропорція, розподіл у крайнім і середнім відношенні, гармонійний розподіл), розподіл відрізка  $AC$  на дві частини таким чином, що більша його частина  $AB$  відноситься до меншого  $BP$  так, як весь відрізок  $AC$  відноситься до  $AB$  (тобто  $AB / BC = AC / AB$ ). Приблизно це співвідношення дорівнює  $5/3$ , точніше  $8/5$ ,  $13/8$  і т. д.

Принципи золотого перетину (співвідношення  $a/b = 0.618$ ) використовуються в архітектурі й в образотворчих мистецтвах. Пропонується, користуватися положенням, що ціле до більшої частини має таке співвідношення, як більша частина до меншої.

Після визначення розмірів елементів, варто скоординувати їх у своїх класах. Наприклад, використовуючи для цього модульну координату. За модуль приймається значимий елемент форми з мінімальними габаритними розмірами або абстрактною величиною, але при цьому необхідно використовувати модульну сітку, крок якої дорівнює цій саме абстрактній величині. Модуль може виконувати свої функції, як у своєму класі, так і стосовно до всіх частин композиції. Наприклад, ілюмінатор корабля. Параметри, що становлять який-небудь ієрархічний рівень

композиції, повинні бути кратними обраному для цього рівня модулю. Наприклад, висота надбудови яхти, що відміряється від головної палуби, повинна бути кратній висоті ілюмінатора, розташованого на надбудові. Але це коректується умовами максимально дозволеної площі ілюмінатора й характеристиками міцності всього корпусу.

Після визначення проекту для дизайну-концепції (ескізного варіанта). Далі починаємо поліпшувати форму й композицію з використанням додаткових пунктів методики системного проектування.

При наявності конструктивних обмежень технічної задачі допускається використовувати різні некратні один одному модулі для координації:

- лінійних параметрів елементів рівня-класу (елементи, що координують, можуть перебувати в різних площинах, бути зорієнтованими в різних напрямках, мати різні форми й кольори);

- коефіцієнтів відбиття поверхні елементів, що лежать у різних площинах, зорієнтованих у різних напрямках, що мають різні форми й кольори;

- кутових параметрів елементів у різних площинах різних форм, розмірів, кольорів.

При проведенні модульної координації усередині візуальних груп необхідно стежити за тим, щоб у пропорційній комбінації простежувалася та сама гармонічна ідея. Наприклад, якщо в комбінаціях більших розмірів, обраних з одного якого-небудь модульного ряду або з різних модульних рядів, прийнята ідея подвоєння або розподілу навпіл, те вона повинна простежуватися й у сполученнях розмірів, кратних більш дрібному модулю. Не повинне порушуватися подібність в структурі великих і дрібних членувань, щоб сполучення членів рядів, утворених більшими модулями, послідовно містили в собі сполучення розмірів з рядів, кратних більш дрібному модулю.

При наявності конструктивних обмежень допускається координація параметрів:

- головного й основного елементів композиції візуальної групи або тільки головного;

- ключового елемента композиції елементів, розташованих ліворуч і зверху, усередині контуру візуальної групи;

- силуету візуальної групи.

Усередині контуру елемента повинні піддаватися модульній координаті:

- параметри, близькі за числовим значенням;

- параметри силуету елемента;

- параметри частин, розташованих ліворуч і зверху від центра ваги елемента;

- параметри ребер, що примикають до композиційного центра високого порядку (утвореного перетином 5 або більшою кількістю візуальних осей).

Будь-яка композиція будується на співвідношенні ознак (на тотожностях, контрастах, нюансах). Вони проявляються у відношенні до форми, орієнтації, місцю розташування, кольору, матеріалу, здатності відбиття світла й т. д. Співвідношення ознак надає композиції внутрішню динаміку. Важливо, щоб вона не дисонувала з основною динамікою форми. Співвідношення двох або декількох рівних по всіх параметрах модулів - тотожність, єдність елементів композиції. Таке співвідношення породжує нудну симетрію або строгу подобу.

Автор методу пропонує вносити ритм і нюанс для додання гостроти в композиції. Ритм - плин, плавна зміна 5-и порядків:

- ритм 1-го порядку де міняється ознака однієї модальності, наприклад так А.А..А...А....А.....А;

- ритм 2-го порядку де міняються ознаки 2-х модальностей, наприклад А.А..А;

- ритм 3-го порядку де міняються три ознаки А.А..А;

- ритм 4-го порядку де міняються відстань між об'єктами, розмір об'єктів, їхній колір, їхня форма;

- ритм 5-го порядку, коли міняються інтервал, форма, колір, розмір, орієнтація.

До об'єкта не обов'язково застосовувати всі перераховані вище положення. Все залежить від складності об'єкта.

Для знаходження нових ідей у методиці пропонується використовувати відомі методи психологічної активації творчого мислення (розд. 3).

## Додаток 2. КОМП'ЮТЕРНІ ІНТЕГРОВАНІ СИСТЕМИ ПРОЕКТУВАННЯ ВИРОБІВ

У даному додатку наведені різні системи й пакети програм для 3D-моделювання в області машинобудування.

**T-FLEX CAD** (вебсайт: [www.tflex.com](http://www.tflex.com), розробник - Топ-Системи, Москва).

Система параметричного проектування й креслення T-FLEX CAD є розробкою російської фірми "Топ Системи". Система має наступні основні можливості: параметричне проектування й моделювання; проектування зборок і виконання складальних креслень; повний набір функцій створення й редагування креслень; просторове моделювання, що базується на технології ACIS; параметричне тривимірне твердотіле моделювання; керування кресленнями; підготовка даних для систем зі ЧПУ; імітація руху конструкції.

**bCAD** (вебсайт: [www.propro.ru](http://www.propro.ru), розробник - ProPro Group, Новосибірськ).

**BlueCAD** (вебсайт: [www.cadware.it](http://www.cadware.it), розробник – CADWare, Італія).

**DesignCAD Pro** (вебсайт: [www.viagrafix.com](http://www.viagrafix.com), розробник – ViaGrafix, США).

**IronCAD** (вебсайт: [www.ironcad.com](http://www.ironcad.com), розробник – Visionary Design Systems, Inc., США).

Системи автоматизованого проектування для машинобудування. Забезпечують двовимірне проектування й тривимірне моделювання.

**КОМПАС** (вебсайт: [www.ascon.ru](http://www.ascon.ru), розробник - Аскон, Росія).

Один з лідируючих російських продуктів. САД-система, призначена для широкого спектра проектно-конструкторських робіт.

**CADMECH** (вебсайт: [www.intermech.host.ru](http://www.intermech.host.ru), розробник – НПО "Интермех", Мінськ).

Система проектування деталей і складальних одиниць на базі AutoCAD й Mechanical Desktop.

**CADRA** (вебсайт: [www.softech.com](http://www.softech.com), розробник – SofTECH, Inc., США).

Система двовимірного проектування й креслення для машинобудування.

**CADkey** (вебсайт: [www.cadkey.com](http://www.cadkey.com), розробник – Baystate Technologies, США).

3D графічний пакет для проектування, твердотілого, поверхневого й каркасного моделювання, візуалізації й документування простих і складних деталей і складальних одиниць.

**Surface Express** (вебсайт: [www.mcsaz.com](http://www.mcsaz.com), розробник – MCS, Inc., США).

**RhinoCeros** (вебсайт: [www.rhino3d.com](http://www.rhino3d.com), розробник – Robert McNeel & Associates, США).

Системи поверхневого моделювання.

**CADdy** (вебсайт: [www.caddy.de](http://www.caddy.de), [www.caddy.ru](http://www.caddy.ru), розробник – ZIEGLER-Informatics GmbH, Німеччина).

Система CADdy призначена для вирішення задач комплексних інтегрованих технологій від стадії проектування до стадії виробництва в таких областях, як: архітектура; проектування промислових установок; машинобудування; електроніка; устаткування будинків (опалення, вентиляція, сантехніка, електротехніка); інженерні мережі й дороги; геодезія, картографія.

**OmniCAD** (вебсайт: [www.cam.it](http://www.cam.it), розробник – CAMM s.r.l., Італія).

Система двовимірного проектування, креслення й тривимірного поверхневого моделювання.

**SolidWorks** (вебсайт: [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com), розробник – SolidWorks Corporation, США).

Потужний машинобудівний CAD пакет для твердотілого параметричного моделювання складних деталей і зборок. Система конструювання середнього класу, що базується на параметричному геометричному ядрі Parasolid.

**SolidEdge** (вебсайт: [www.ug.eds.com](http://www.ug.eds.com), [www.ugsolutions.ru](http://www.ugsolutions.ru), розробник – Unigraphics Solutions, США).

SolidEdge є принципово новою системою автоматизованого конструювання, що призначена для розробки складальних вузлів і геометричного моделювання окремих деталей. Solid Edge розроблений спеціально для конструювання виробів машинобудування. Є системою середнього рівня, що забезпечує

ефективне об'єктно-орієнтоване параметричне моделювання.

**Think3** (вебсайт: [www.think3.com](http://www.think3.com), розробник – think3, Inc., США).

Система автоматизованого проектування для машинобудування середнього рівня. Забезпечує двовимірне проектування, тривимірне поверхневе й твердотільне моделювання, проектування виробів з листових матеріалів, асоціативність двовимірного креслення із тривимірною моделлю, фотореалістичне зображення проекту.

**Cimatron** (вебсайт: [www.cimatron.com](http://www.cimatron.com), розробник – Cimatron Ltd., Ізраїль).

Cimatron - інтегрована CAD/CAM - система, що надає повний набір засобів для конструювання виробів, розробки креслярсько-конструкторської документації, інженерного аналізу, створення керуючих програм для верстатів зі ЧПУ. Cimatron працює на різних платформах.

**TEBIS** (вебсайт: [www.tebis.de](http://www.tebis.de), розробник – Tebis AG, Німеччина).

**VISI - Series** (вебсайт: [www.veroint.com](http://www.veroint.com), [www.verosoft.com](http://www.verosoft.com), розробник – Vero International, Inc., США).

CAD/CAM - система. Забезпечує двовимірне проектування й креслення, тривимірне поверхневе й твердотіле моделювання, генерацію програм для верстатів зі ЧПУ, візуалізацію обробки деталей.

**HELIX** (вебсайт: [www.microcadam.co.uk](http://www.microcadam.co.uk), розробник – MicroCADAM Ltd., Великобританія).

**Form-Z** (вебсайт: [www.formz.com](http://www.formz.com), розробник – Autodesk, Inc., США).

**Alias/Wavefront** (вебсайт: [www.aw.sgi.com](http://www.aw.sgi.com), розробник – Alias/Wavefront, Канада).

Розповсюджені програмні продукти двовимірного й тривимірного виконання ескізів й креслення, тривимірного поверхневого й твердотілого моделювання, візуалізації й анімації, для професійного дизайну й проектування.

**CoCreate** (вебсайт: [www.cocreate.com](http://www.cocreate.com), розробник – CoCreate Software, Inc., Німеччина).

Серія продуктів для проектування й керування даними проекту: **ME10** - проектування й креслення; **SolidDesigner** -

твердотільне моделювання й керування даними проекту.

**VX VISION** (вебсайт: [www.vx.com](http://www.vx.com), розробник – Varimetrix Corp., Ltd., США).

CAD/CAM/CAE система середнього рівня.

**CADMAX** (вебсайт: [www.cadmax.com](http://www.cadmax.com), розробник – CADMAX Corp., США).

CADMAX SolidMaster - система автоматизованого проектування, що забезпечує двовимірне проектування, тривимірне поверхневе й твердотільне моделювання.

**BRAVO** (вебсайт: [www.applicon.com](http://www.applicon.com), розробник – Applicon, Inc., США).

Сімейство продуктів для проектування, підготовки конструкторської документації, підготовки виробництва й керування проектом у машинобудуванні.

**MicroStation** (вебсайт: [www.bentley.com](http://www.bentley.com), розробник – Bentley, США).

MicroStation - професійна, високо продуктивна система для 2D/3D - автоматизованого проектування при виконанні робіт, пов'язаних із кресленням, конструюванням, візуалізацією, аналізом, керуванням базами даних і моделюванням.

MicroStation 95 - система колективної роботи, що дає всім учасникам групи гарантію взаємного узгодження незалежно від апаратного розвитку платформ.

**Genius** (вебсайт: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com), розробник – Genius CAD-Software GmbH, Німеччина).

Продукти Genius є програмним забезпеченням для конструювання в машинобудуванні й створення креслень із застосуванням AutoCAD.

Genius Desktop – об'єктно-орієнтована система тривимірного проектування машинобудівних деталей і зборок на базі Mechanical Desktop.

Genius 14 - продукт, що забезпечує високопродуктивне двовимірне автоматизоване проектування й креслення в області машинобудування в середовищі AutoCAD.

Genius LT 97 - система двомірного автоматизованого проектування, призначена для створення й оформлення машинобудівних креслень і конструкторської документації на базі AutoCAD.



**Power Solutions** (вебсайт: [www.delcam.com](http://www.delcam.com), розробник – DELCAM Plc., Великобританія).

Сімейство продуктів Power Solutions охоплює всі етапи виробничого циклу:

- PowerShape - CAD- система, що включає поверхневе й твердотільне моделювання складних виробів.

- PowerMILL - потужна й проста у використанні автономна система автоматичної підготовки керуючих програм для 3 - 5 координатної фрезерної обробки на будь-якому верстаті зі ЧПУ виробів, спроектованих у будь-якій CAD-системі.

- FeatureCAM - система автоматичної підготовки керуючих програм для токарної й фрезерної обробки виробів.

- CopyCAD - система для зворотного проектування від зразка до моделі, забезпечує перетворення даних, отриманих з координатно-виміральної машини, у комп'ютерну поверхневу модель.

- PowerINSPECT - система для контролю складних деталей на контрольно-вимірювальних машинах й їхнє автоматичне порівняння з комп'ютерною моделлю.

- ArtCAM - пакет для створення об'ємного рельєфу на базі векторного й/або растрового малюнка й створення керуючих програм для його механічної обробки.

**HyperMILL** (вебсайт: [www.openmind.de](http://www.openmind.de), розробник – Open Mind Software Technologies GmbH, Німеччина).

Пакет, що дозволяє реалізувати завершальну технологічну ланку в наскрізній CAD/CAM/CAE-технології - підготовка керуючих програм для верстатів зі ЧПУ й виготовлення виробів.

**EdgeCAM** (вебсайт: [www.pathtrace.com](http://www.pathtrace.com), розробник – Pathtrace, Великобританія).

CAM - система. Рішення для фрезерної, поверхневої, токарної й електроерозійної обробки деталей.

**ESPRIT** (вебсайт: [www.dptechnology.com](http://www.dptechnology.com), розробник – DP Technology, США).

CAD/CAM - система на базі ядра Parasolid.

**SolidCAM** (розробник – CADTECH, Ізраїль).

Пакет генерації керуючих програм для верстатів зі ЧПУ при обробці деталей, що містять складну поверхневу або твердотілу геометрію. Забезпечує 2,5 й 3-осьову фрезерну обробку, токарну

обробку, візуалізацію процесу обробки.

**MasterCAM** (вебсайт: [www.mastercam.com](http://www.mastercam.com), розробник – CNC Software, США).

**CAD/CAM** - система, що займає лідируюче положення у світі по кількості продажів й інсталяцій пакету серед CAD/CAM систем. Забезпечує каркасне й поверхнєве моделювання деталей, візуалізацію й документування простих і складних деталей і складальних одиниць, розробку керуючих програм для токарної, фрезерної, електроерозійної обробки на верстатах зі ЧПУ.

**PEPS** (вебсайт: [www.camtek.co.uk](http://www.camtek.co.uk), розробник – Camtek Ltd., Великобританія).

**CAM** - система, автоматизована підготовка фрезерної, токарної, лазерної, електроерозійної обробки деталей.

**СПРУТ** (вебсайт: [www.sprut.ru](http://www.sprut.ru), розробник – АО "Спрут-Технология", г. Набережні Челни, Росія).

Система технологічного проектування.

**EUCLID3** (вебсайти: [www.eads.matradatavision.com](http://www.eads.matradatavision.com), [www.cad.by.ru](http://www.cad.by.ru), розробник – EADS MATRA Datavision, Франція).

САПР високого рівня **EUCLI**, що охоплює всі етапи проектування, розроблена фірмою MATRA DATAVISION, з оборотом більше 10 мільярдів доларів США. Фірма займається розробкою, продажем і супроводом програмного забезпечення CAD/CAM/CAE/PDM і програмного середовища для створення додаткових модулів. Основні продукти фірми мають торговельні марки: EUCLI, PRELUDE, CAS.CADE. Вони призначені для таких областей, як авіація, космос, автомобілебудування, оборона, електромеханіка, промисловий дизайн, атомне машинобудування, інжиніринг, виробництво товарів широкого вжитку й ін.

**Pro/ENGINEER** (вебсайти: [www.ptc.com](http://www.ptc.com), [proe.ru](http://proe.ru), розробник – Parametric Technology Corporation, США).

Система високого рівня, САПР для єдиного циклу проектування-виробництво. Програмний комплекс Pro/ENGINEER охоплює весь цикл "конструювання - виробництво" у машинобудуванні.

**CATIA**, вебсайти: [www.catia.com](http://www.catia.com), [www.catia.ru](http://www.catia.ru), розробники – DASSAULT SYSTEMES (Франція) і IBM (США).

CATIA/CADAM Solutions - повністю інтегрована універсальна CAD/CAM/CAE система високого рівня, що дозволяє

забезпечити паралельне проведення конструкторсько-виробничого циклу, будучи універсальною системою автоматизованого проектування, випробування й виготовлення, широко застосовується на великих машинобудівних підприємствах в усьому світі для автоматизованого проектування, підготовки виробництва, зворотного інжинірингу.

Функції, підтримувані **CATIA/CADAM Solutions**:

- адміністрування - планування, керування ресурсами, інспектування й документування проекту;
- досконалі можливості моделювання;
- опис всіх механічних зв'язків між компонентами об'єкта й приведення їх у стан просторового взаємопозиціонування;
- автоматичний аналіз геометричних і логічних конфліктів;
- аналіз властивостей складних зборок;
- розроблений інструментарій трасувань систем комунікацій з дотриманням заданих обмежень;
- спеціалізовані програми для технологічної підготовки виробництва.

**Unigraphics** (вебсайти: [www.ug.eds.com](http://www.ug.eds.com), [www.ugsolutions.ru](http://www.ugsolutions.ru), розробник - Unigraphics Solutions, Inc., США).

Система Unigraphics це CAD/CAM/CAE - система високого рівня. Unigraphics дозволяє здійснювати повністю віртуальне проектування виробів, Меланообробку деталей складних форм, має повністю асоціативну базу даних майстрів-моделі.

**I-DEAS Master Series** (вебсайт: [www.sdrc.com](http://www.sdrc.com), розробник - Structural Dynamics Research Corporation, США).

Програмний комплекс I-DEAS Master Series дає можливість оптимізувати концепцію виробу на ранній стадії проектування, дозволяючи значно поліпшити якість виробу при зменшенні часу розробки й витрат. IDEAS надає можливості для паралельної групової роботи, для рішення багатодисциплінарних інженерних задач у процесі розробки механічних виробів.

**ADAMS** (вебсайти: [www.adams.com](http://www.adams.com), [www.adams.ru](http://www.adams.ru), розробник - Mechanical Dynamics, США).

Динаміка й кінематика складних механічних схем (механізмів) довільного виду, у т.ч. у реальному масштабі часу. Двосторонній зв'язок з більшістю скінчено-елементних пакетів. Візуалізація результатів моделювання (відеореалістична анімація).

**DYNAMIC DESIGNER** (розробник - Mechanical Dynamics, США).

Інтегрований у середовище Mechanical Desktop розрахунковий модуль для проведення динамічного й кінематичного аналізу механізмів.

**ANSYS** (вебсайти: [www.ansys.com](http://www.ansys.com), [www.ansys.ru](http://www.ansys.ru), розробник - ANSYS Inc., США).

Скінчено-елементний пакет, що найбільш широко використовується у світі як засіб забезпечення інженерних розрахунків. Універсальний розрахунковий комплекс, застосовуваний у різних видах аналізу. Використовується для розрахунку конструкцій різного типу (авіабудування, суднобудування, машинобудування, будівництва, енергетики й ін.) на впливи різної природи. З його допомогою виробляється як лінійний, так і нелінійний статичний і динамічний аналіз конструкцій, аналіз утомних пошкоджень, рішення лінійних і нелінійних завдань стійкості й теплофізики. Задачі гідро - і газодинаміки, акустики, електродинаміки й електростатики, п'єзоелектрики. Єдиний із представлених на світовому ринку комплекс, за допомогою якого з використанням однієї бази вирішуються зв'язані задачі типу теплофізика-міцність, електродинаміка-міцність, гідро-газодинаміка й міцність й ін.

ANSYS дозволяє в процесі проектування передбачати поведінку виробу й провести аналізи на міцність, модальний і тепловий; відомості про напруги, деформації, розподіли температур і теплових потоків, що виникають у виробі. Грунтуючись на виведених програмою колірних контурах, що представляє градації "потрібності" матеріалу (залишити або прибрати), конструктор прибирає непотрібний матеріал, підводячи конструкцію до оптимального вагового співвідношення.

**DesignSpace** (вебсайт: [www.designspace.com](http://www.designspace.com), [www.ansys.com](http://www.ansys.com), розробник - ANSYS Inc., США).

Програма, спеціально призначена для роботи в середовищі Mechanical Desktop (вбудовується в меню й використовує інтерфейс програми і геометрію). Пакет DesignSpace дозволяє проводити перевірочні й проектувальні розрахунки елементів тільки твердотілих конструкцій, створених у середовищі Autodesk Mechanical Desktop. У ньому реалізовані розрахунки статичної

міцності конструкцій і визначення форм і частот власних коливань.

**MSC/InCheck** (розробник - The MacNeal-Schwendler Corporation, США).

Інтегрований в Mechanical Desktop розрахунковий модуль для проведення аналізу на міцність й оптимізації конструкції: статична міцність (напруги й деформації); вібрації; стійкість; тепловий аналіз (теплопровідність і теплообмін).

**3D QuickFill** (розробник - Advanced CAE Technologies, Inc., США).

Програма, що дозволяє на ранніх стадіях проектування виробу провести аналіз лиття за тривимірною твердотілою моделлю. Надає конструкторові можливість спостерігати процес заповнення форми для відливання з наданням наступних параметрів: час заповнення прес-форми; час охолодження літали; розподіл температури; наявність "раковин"; маса готового виробу.

**DEF CAR** (вебсайт: [www.defcar.es](http://www.defcar.es), розробник - Defcar Ingenieros, S.L., Іспанія).

CAD/CAM - система для проектування й підготовки виробництва в кораблебудуванні.

**LS-DYNA**, вебсайти: [www.llnl.gov](http://www.llnl.gov), [www.lsdyna.com](http://www.lsdyna.com), [www.feainformation.com](http://www.feainformation.com), [www.cadfem.ru](http://www.cadfem.ru), розробник - LSTC (Livermore Software Technology Corp.), комерційний підрозділ всевітньо відомого ядерного центру LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), США.

Універсальний розрахунковий програмний комплекс, орієнтований на чисельне моделювання високонелінійних і скороминучих процесів у термомеханічних задачах механіки деформованого тіла й рідкої речовини. Серед цивільних програм - краш-тести, обробка металів тиском, загальні задачі динамічної міцності, руйнування, взаємодії деформованої конструкції з рідинами й газами й ін.

**STAR-CD** (вебсайти: [www.cd.co.uk](http://www.cd.co.uk), [www.cadfem.ru](http://www.cadfem.ru), розробник - CD-adapco group, Великобританія).

Багатоцільовий пакет для рішення промислових задач механіки рідин і газів.

**AutoSEA**, вебсайт: [www.vasci.com](http://www.vasci.com), [www.cadfem.ru](http://www.cadfem.ru), розробник - VASCI (Vibro Acoustic Sciences), США.

Розрахунковий пакет віброакустичного аналізу в області

середніх і високих частот.

**LVMFlow** (вебсайт: [www.intersed.kiev.ua](http://www.intersed.kiev.ua)).

Професійна САМ-система комп'ютерного 3D моделювання ливарних процесів що дозволяє автоматизувати робоче місце технолога-ливарника.

**QFORM3D** (вебсайт: [www.intersed.kiev.ua](http://www.intersed.kiev.ua)).

QFORM3D застосовується для моделювання процесів гарячого й холодного об'ємного штампування. Програма передбачає виникнення дефектів плинину металу, визначає розподіл температури, оцінює навантаження й витрату енергії на деформацію.



Навчальне видання

Грабченко Анатолій Іванович,  
Федорович Володимир Олексійович,  
Гаращенко Ярослав Миколайович

## **МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Навчальний посібник  
для студентів машинобудівних спеціальностей

Відповідальний за випуск А.І. Грабченко  
Роботу рекомендував до видання О.М. Шелковой

План 2009 р., поз.

Підписано до друку 10.06.2009. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Папір офсетн.

Друк – різнографія. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 6,3.

Наклад 100 прим. Зам. № 391. Ціна договірна.

---

Видавництво НТУ "ХП".

Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
суб'єктів видавничої справи ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавництво Курсор.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
суб'єктів видавничої справи ДК № 21 від 24.03.2000 р.  
61057, м. Харків, пр. Театральний 11/13  
т. (057) 714-38-74, 706-31-73

---

Віддруковано в типографії  
ТОВ СУНП "Бруксафоль - Курсор Фоліен"  
61057, м. Харків, пр. Театральний 11/13  
т. (057) 714-38-74, 706-31-73