

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов

Сучасні інформаційні технології та
системний аналіз
у наукових дослідженнях

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня доктора філософії
за спеціальністю 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

УДК 004.8

Ч 45

Рецензенти: **Ковбасюк Сергій Валентинович**, д-р техн. наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, керівник навчально-наукового центру космічних технологій Поліського національного університету

Квасніков Володимир Павлович д-р технічних наук, професор, Заслужений метролог України, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету

Корнага Ярослав Ігорович, д-р техн. наук, професор
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Відповідальний редактор **Киричук Юрій Володимирович**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 2 від 09.12.2021 р.) за поданням Вченої ради Приладобудівного факультету (протокол № 10/21 від 22.11.2021 р.)

Навчальне видання

Черепанська Ірина Юріївна, д-р. техн. наук, доц.
Сазонов Артем Юрійович, канд. техн. наук, доц.

Ч 45 Сучасні інформаційні технології та системний аналіз у наукових дослідженнях: навч. посіб. для здобувачів освітнього ступеня доктора філософії спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” всіх форм навчання / І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 270 с.

Підготовлено відповідно до освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Наведено методи системного аналізу та принципи системного підходу а також розглянуто різноманітні сучасні інформаційні технології, зокрема, технології м’яких обчислень, нейротехнології, технології fuzzy logic, технологію Excel Solver та ін., що використовуються для автоматизації обробки та аналізу даних, розв’язання задач дослідження операцій та прийняття рішень у системному аналізі при проведенні наукових досліджень, в тому числі у сфері автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій. Наведено приклади практичних задач та індивідуальні завдання для самостійних робіт аспірантів.

Для аспірантів та викладачів спеціальності “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”, фахівців даної галузі.

УДК 004.8

© І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, 2021

© КПІ імені І. Сікорського, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВИКОРИСТАНІ ПІКТОГРАМИ.....	6
ВСТУП.....	7
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ	9
1.1. Наукові дослідження. Види наукових досліджень.....	9
1.2. Етапи наукових досліджень	11
1.3. Представлення результатів наукових досліджень.....	32
2. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ.....	33
2.1. Зміст системного аналізу та системного підходу.....	33
2.2. Теоретичні основи системного аналізу та системного підходу	36
2.3. Система як об'єкт дослідження.....	40
2.4. Види систем	45
2.4.1. Матеріальні та абстрактні системи	46
2.4.2. Штучні та природні системи.....	47
2.4.3. Прості, складні та великі системи	48
2.4.4. Статичні та динамічні системи	52
2.4.5. Керовані та некеровані системи.....	53
2.4.6. Детерміновані та стохастичні системи.....	56
2.4.7. Дискретні та безперервні системи	57
2.4.8. Відкриті та закриті (замкнуті) системи.....	59
2.5. Методи системного аналізу та принципи системного підходу.....	60
2.5.1. Характеристика принципів системного підходу.....	60
2.5.2. Евристичні методи системного аналізу	68
2.5.3. Формалізовані методи системного аналізу.....	86
2.5.3.1. Метод розв'язання задачі багатокритеріального вибору	87
2.5.3.2. Методи дослідження операцій	96
2.5.3.3. Моделі типових задач дослідження операцій	104

2.5.3.3. Графи в задачах системного аналізу	113
2.5.4. Комплексні методи системного аналізу	120
3. СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ.....	122
3.1. Технології імітаційного моделювання процесів на прикладі системи Arena.	122
3.2. Технологія Excel Solver для автоматизації розв'язання типових задач дослідження операцій	133
3.3. Технології м'яких обчислень (Soft Computing).....	141
3.4. Нейротехнології обробки даних.....	149
3.5. Технологія fuzzy logic.....	174
3.6. Технологія генетичних обчислень	206
4. ПРАКТИКУМ.....	218
4.1. Метод експертних оцінок для визначення критеріїв вибору найкращої моделі промислового роботу при синтезі роботизованих механоскладальних технологій	218
4.2. Методи дослідження операцій для розв'язання однокритеріальних оптимізаційних задач.....	231
4.3. Автоматизація розв'язання типових логістичних задач на основі технології Excel Solver	235
4.3. Автоматизація розв'язання типових задач планування виробництва на основі технології Excel Solver та аналіз розв'язку задачі на чутливість.....	242
4.4. Аналіз задачі на чутливість	249
5. САМОСТІЙНА РОБОТА	251
5.1. Загальні методичні вказівки до самостійної роботи	251
3.2. Теоретичні питання для самостійного вивчення.....	253
5.3. Зміст завдань для контрольної та / або самостійної роботи	256
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	258
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	266

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДСНТІ – державна система науково-технічної інформації

ЦНТІ – центр науково-технічної інформації

НТІ – Науково-технічна інформація

ПК – персональний комп'ютер

ІТ – інформаційна технологія

ШІ – штучний інтелект

ШНМ – штучна нейронна мережа

ОК – об'єкт керування

СК – суб'єкт (система) керування

ОС – операційна система

ПК – персональний комп'ютер

ГВС – гнучка виробнича система

ТО – технологічне обладнання

ПР – промисловий робот

ОВ – об'єкт виробництва

ТП – технологічний процес

ГКІС – гнучка комп'ютерно-інтегрована система

SC – м'які обчислення

FL – нечітка логіка

NC – нейрообчислення

GC – генетичні обчислення

PC – ймовірні обчислення

ВИКОРИСТАНІ ПІКТОГРАМИ



Відомості, що необхідно запам'ятати.



Завдання на самостійну роботу та контрольні питання.



Інформація, що наводиться як приклад.



Цікава та корисна інформація.

ВСТУП

Наука, як історично усталена форма складної діяльності, є потужною рушійною силою розвитку людства та його добробуту. Всесвітня організація ЮНЕСКО визначає створення нових знань для підвищення якості життя та вдосконалення освіти основними функціями науки. Саме тому популяризація наукових знань серед різних верств населення, а особливо молоді, залучення їх до участі в науковому житті є вирішальним фактором у формуванні знань та вмінь, які дозволяють робити свідомий вибір як в особистому так і в професійному плані.

Розвиток науки, техніки та інновацій у ХХІ столітті відбувається на фоні соціально-економічних, екологічних та геополітичних тенденцій, які формують сучасну політику в цій сфері. У зв'язку з цим науку можна розглядати деякий “соціальний інститут, що виконує певну соціальну задачу зміст якої полягає у “розробці нових технологій для задоволення суспільних потреб” [1]. Зокрема за твердженням академіка В.С. Стьопина “мета наукового пізнання полягає у передбаченні процесу перетворення предметів практичної діяльності у відповідні продукти. Це перетворення завжди визначено сутнісними зв'язками, законами зміни і розвитку об'єктів, і сама діяльність може бути успішною тільки тоді, коли вона узгоджується з цими законами. Тому головна задача науки – виявити закони, у відповідності до яких змінюються і розвиваються об'єкти [1].

Очевидно, що наука повинна відповідати потребам сучасного суспільства і допомагати йому справлятися з глобальними проблемами, які на сьогодні знаходяться за межами окремих дисциплін та об'єднують багато різних наукових галузей. Наука, техніка та інновації є основою забезпечення безпечного, сталого та успішного розвитку як окремих держав так і людства у цілому. За заявою Генерального директора ЮНЕСКО Ірини Бокової наукові дослідження є як прискорювачем економічного розвитку, так і визначаючим фактором побудови більш стійких та благополучних суспільств. Із Доповіді ЮНЕСКО по науці ще у 2016 році представленої в літературі [2] випливає, що на сьогоднішній

день більшість країн світу, не залежно від рівня доходів, роблять ставку на наукові дослідження та інновації.

Особлива увага приділялась та приділяється технічним наукам, розвиток яких почався ще за часів І. Ньютона, а розквіт відбувся у ХХ столітті, адже саме вони є засобом створення та вдосконалення техніки і технологій, та мають тісний зв'язок із практичними потребами людства.

Розгорнутий аналіз історії науки показує, що наукова діяльність завжди була та залишається спрямованою на вирішення соціальних технічних задач. Зв'язок наукових досліджень з технічними задачами та технологіями обумовлений власне природою науки, адже характерною особливістю будь якого наукового дослідження є експеримент, що передбачає певний вплив на об'єкт дослідження. А формування та реалізація цього впливу вимагає винаходу відповідних технічних засобів та технологій. Отже очевидно, що наука має тісний зв'язок з технікою. Історія науки чітко показує, як винахід все більш досконалих технічних засобів та технологій експериментування не тільки давав потужний стимул збільшенню знань, але поступово переростав у створення технологій, які сьогодні отримали та продовжують отримувати широке поширення в суспільному житті. Саме тому представники технонауки та інженери у сучасному світі користуються великою повагою та визнанням [1].

Необхідно відмітити, що характерними відмінностями сучасної науки є підсилення математизації, зрощення фундаментальних і прикладних досліджень, а також застосування нових логічних апаратів та сучасних інформаційних технологій, що є більш придатними для фіксації нових підходів щодо аналізу явищ сучасної дійсності. Саме це обумовлює використання таких неklasичних (неарістотилевських) логік як fuzzy logic, нейронних мереж, генетичних алгоритмів та ін., що складають основу сучасних інформаційних технологій та успішно використовуються у наукових дослідженнях при вирішенні різноманітних задач прикладного характеру.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

1.1. Наукові дослідження. Види наукових досліджень

Наукове дослідження – це історична форма складної інтелектуальної діяльності обумовлена суспільними потребами і направлена на вивчення об'єктів різної природи, закономірностей їх будови, законів функціонування, виникнення, розвитку, принципів управління ними. Всі наукові дослідження стимулюються прагненням до стабільного та безпечного розвитку людства та підвищення його добробуту.

В цілому наукове дослідження або наукова діяльність спрямована на отримання нових знань та їх застосування. Традиційно під науковим дослідженням прийнято розуміти наведене нижче.

Наукове дослідження – це діяльність, спрямована на вивчення об'єкта з метою встановлення закономірностей його будови, виникнення і розвитку, а також подальше використання отриманого знання в практичній діяльності людей [3].



Наукове дослідження – процес вироблення нових знань, один з видів пізнавальної діяльності, що характеризується об'єктивністю, відтворюваністю, точністю та має два рівні – емпіричний і теоретичний.

Традиційно всі наукові дослідження поділяють на *фундаментальні* і *прикладні*, *теоретичні* та *емпіричні*. Такий поділ обумовлюється розширенням масштабів наукової діяльності та широким застосуванням її результатів на практиці.



Фундаментальне дослідження – це теоретична і експериментальна діяльність, спрямована на отримання знань про закономірності розвитку природи, суспільства і людини [3].

Фундаментальні дослідження пов'язані з вивченням нових явищ, ефектів та процесів, з відкриттям нових законів управління процесами.

Наприклад, до фундаментальних досліджень можна віднести дослідження закономірностей поведінки людини при прийнятті рішень.



Прикладне дослідження – це діяльність, направлена на отримання та застосування знань для вирішення прикладних проблем, що виникають у сфері практичної діяльності людства [3].

Прикладні наукові дослідження використовують результати фундаментальних досліджень для задоволення потреб суспільства, покращення якості його життя, забезпечення стабільності розвитку.

Прикладами прикладних наукових досліджень є наукові дослідження направлені на створення нових покращених технологій виробництва, обробки інформації, аналізу даних, нових вимірювальних приладів з покращеними метрологічними характеристиками тощо.

Загалом поділ наукових досліджень на фундаментальні та прикладні є наслідком поділу досить складної праці науковців. Наука, як складна діяльність, спонукає вчених до диференціації та концентрації зусиль або на фундаментальних дослідженнях, що мають пошуковий характер, або на прикладних дослідженнях, що полягають у виявленні принципів і методів застосування нових наукових фундаментальних досліджень на практиці.

Теоретичні та емпіричні наукові дослідження розрізняються за характером предмету дослідження і за методами дослідження, що застосовуються.



Емпіричне дослідження (емпіричний – дослівно – той, що сприймається органами відчуття) – це дослідження, що спрямоване, переважно, на виявлення зв'язків в досліджуваному об'єкті. Воно спирається на дані спостережень і експериментів [3].



Теоретичне дослідження – це дослідження, спрямоване на пояснення суті зв'язків в досліджуваних об'єктах, на дослідження внутрішнього механізму явищ. Кінцевою метою теоретичного дослідження є розробка концепцій і теорій [3]. Теоретичне дослідження спирається на аналіз, синтез, порівняння, абстрагування, моделювання тощо.

1.2. Етапи наукових досліджень

Результатом наукового дослідження є нове наукове знання. Досягнення результату передбачає виконання певних видів робіт трудомісткого характеру. Наприклад, проводиться аналіз інформаційних джерел; експериментальні дослідження; комп'ютерне, імітаційне моделювання; опублікування результатів тощо (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Наукові роботи та види наукових результатів

Роботи при науковому дослідженні виконуються поетапно.

Етап I. Формулювання теми, постановка проблеми та визначення мети наукового дослідження.

Наукове дослідження завжди передбачає вирішення будь-якої наукової проблеми. Підставами для проведення наукового дослідження завжди є недостатність знань, фактів, суперечливість наукових уявлень.

Тема наукового дослідження повинна бути **актуальною**, тобто корисною для задоволення наукових, соціальних, технічних і економічних потреб суспільства.



Актуальність теми – це поняття, що характеризує суспільну потребу в дослідженнях з даної тематики. Актуальність теми є необхідною (хоча і не достатньою) умовою корисності результату дослідження [3].

Враховуючи те що, розвиток науки сьогодні відбувається на фоні соціально-економічних, екологічних та геополітичних тенденцій, які формують сучасну політику в цій сфері, а також те, що наука повинна відповідати потребам сучасного суспільства і допомагати йому справлятися з глобальними проблемами, то на сьогоднішній день більшість країн світу, не залежно від рівня доходів, роблять ставку на наукові дослідження та інновації за пріоритетними і стратегічними напрямками. Зокрема в Україні пріоритетні та стратегічні напрями наукових досліджень та інноваційної діяльності визначаються статтями Закону України №3715-VI “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні”.

Постановка наукової проблеми передбачає:

– виявлення існування дефіциту знань, фактів, суперечливість наукових уявлень в певній галузі;

– усвідомлення потреби в усуненні дефіциту знань, фактів, суперечливості наукових уявлень в певній галузі;

– формулювання проблеми досліджень, що мають фундаментальний або прикладний характер.

Переважає більшість наукових проблем у технічних, економічних, аграрних, екологічних, військових та ін. галузях мають прикладний характер. З цих позицій можна дати наступне визначення наукової проблеми прикладного характеру.



Наукова проблема прикладного характеру – це ситуація, що виникає на практиці та характеризується протиріччям між двома станами: існуючим і бажаним. Розв'язати проблему означає усунути розрив між цими двома станами [3].

Мета наукового дослідження формулюється коротко і чітко, в змістовному плані висловлюючи те основне, що має намір зробити дослідник, до якого кінцевого результату він прагне.



ПРИКЛАД 1. *Метою наукового дослідження за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” [4] є підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань.*

ПРИКЛАД 2. *Метою наукового дослідження за темою “Автоматизація процесу керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем” [5] є підвищення якості та зменшення трудомісткості рішень, що приймаються при проектуванні складних розподілених у просторі організаційно-технічних об'єктів і комплексів, за рахунок розробки та впровадження інформаційного, методичного, алгоритмічного та програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизованих процесів керування вибором пристроїв орієнтування на етапі вибору засобів технологічного оснащення гнучких інтегрованих систем.*

Варто вказати, що передбачувану тему наукових досліджень необхідно оцінити з точки зору можливості експериментальних досліджень, зокрема наявності необхідної множини досліджуваних об'єктів для формування

експериментальної і контрольної груп, науково-дослідницької апаратури, створення відповідних умов для проведення експерименту тощо.

Етап II. Визначення об'єкту та предмету наукового дослідження.

Формулювання теми і проблеми дає можливість визначити об'єкт і предмет дослідження.



Об'єкт дослідження – це явище або процес, що породжує проблемну ситуацію і внаслідок цього вибирається для вивчення [3].



Предмет дослідження – це та сторона об'єкта дослідження, яка розглядається в даній дослідницькій роботі [3].

Об'єкт і предмет дослідження співвідносяться між собою як загальне і часткове відповідно.



ПРИКЛАД 1. *Об'єктом* наукового дослідження за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” [4] є *процес вимірювання величини плоских кутів за допомогою прецизійної приладової системи вимірювання кутів. Предметом* дослідження є *прецизійна приладова система вимірювання кутів підвищеної точності та швидкодії.*

ПРИКЛАД 2. *Об'єктом* наукового дослідження за темою “Автоматизація процесу керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем” [5] є *проектування гнучких комп'ютерно-інтегрованих систем (ГКІС) на етапі технологічної підготовки гнучких виробничих систем при виборі технологічного обладнання, зокрема системи орієнтації об'єктів виробництва як розподіленої у просторі та у часі підсистеми ГКІС. Предметом* дослідження є *процес вибору пристроїв орієнтування для використання у проектуванні ГКІС, що відрізняються*

фізичними принципами реалізації, конструктивною та технологічною базами виконання, складом функціональних засобів і устаткування, технічним призначенням і методами керування на різних рівнях ієрархічної структури.

Етап III. Визначення задач наукового дослідження.

Для досягнення поставленої мети наукового дослідження необхідно вирішити низку задач. Тобто поставлена мета наукового дослідження піддається уточненню і декомпозиції, в результаті чого формується перелік часткових задач / завдань наукової роботи.

Задач / завдань ставиться декілька. Кожна задача повинна мати чітке формулювання, розкривати ту сторону теми, яка піддається дослідженню. Визначаючи задачі / завдання, необхідно враховувати їх взаємозв'язок. Іноді неможливо розв'язати одну задачу, не розв'язавши попередньо іншу. Кожна поставлена задача повинна мати рішення, відбите в одному або декількох висновках.

Перша задача / завдання, як правило, пов'язана з виявленням, уточненням, поглибленням, методологічним обґрунтуванням суті, структури досліджуваного об'єкта.

Друга задача / завдання пов'язана з аналізом реального стану предмета дослідження.

Третя задача / завдання пов'язана з перетвореннями предмета дослідження, тобто виявленням шляхів і засобів підвищення ефективності вдосконалення досліджуваного явища або процесу.

Четверта задача / завдання – з дослідно-експериментальною перевіркою ефективності пропонованих перетворень.

Очевидно, що кількість завдань наукового дослідження може варіюватись в кожному конкретному випадку.



ПРИКЛАД 1. В науковому дослідженні за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” [4] метою якого є підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань,

необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Провести аналіз існуючих приладових систем вимірювання кутів та систематизувати відомі підходи щодо підвищення точності та швидкодії для використання отриманих результатів при побудові прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК);

2. Запропонувати сукупність принципів для побудови ППСВК з підвищеною точністю та швидкодією;

3. Оновити математичну модель похибки ППСВК, яка системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання;

4. Розробити підхід до визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів;

5. Розробити штучні нейронні мережі (ШНМ) для функціонування ППСВК з огляду необхідності автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів;

6. Розвинути метод ковзного середнього щодо фільтрації вихідного сигналу ППСВК для зменшення флуктуацій та підвищення точності вимірювання;

7. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що реалізує автоматизоване функціонування ППСВК, та рекомендації щодо його практичного використання;

8. Впровадити результати роботи у виробництво та у навчальний процес університету.



Приклад 2. В науковому дослідженні за темою “Автоматизація процесу керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем” [5] метою якого є підвищення якості та зменшення трудомісткості рішень, що приймаються при проектуванні складних розподілених у просторі

організаційно-технічних об'єктів і комплексів, за рахунок розробки та впровадження інформаційного, методичного, алгоритмічного та програмного забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизованих процесів керування вибором пристроїв орієнтування на етапі вибору засобів технологічного оснащення гнучких інтегрованих систем необхідно вирішити наступні *задачі*:

1. На основі аналізу сутності та особливостей процесу автоматичного орієнтування запропонувати формалізований опис орієнтуючих рухів об'єктів виробництва;

2. Провести аналіз функціональних можливостей пристроїв орієнтування щодо реалізації можливих орієнтуючих рухів при автоматичному орієнтуванні об'єктів виробництва;

3. На основі попередньо визначених функціональних зв'язків між складовими системи орієнтації об'єктів виробництва розробити формалізований опис функціональних можливостей пристроїв орієнтування щодо автоматичного орієнтування об'єктів виробництва, а також формалізований опис системи орієнтації об'єктів виробництва в цілому на основі узгоджених класифікацій та формалізованих описів пристроїв орієнтування та об'єктів виробництва;

4. Розробити методику автоматизованого вибору пристроїв орієнтування як основу системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування;

5. Розробити інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення системи підтримки прийняття рішень для автоматизації процесу керування вибором пристроїв орієнтування;

6. Провести апробацію виконаних розробок.

Етап IV. Формулювання плану наукового дослідження та визначення методів досліджень.

План наукових досліджень, як правило, відображає послідовність розв'язання задач, що були сформульовані на *етапі III* та передбачає їх деталізацію.



ПРИКЛАД 1. В науковому дослідженні за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” [4] метою якого є підвищення точності та швидкодії гоніометричних вимірювань розв'язано вісім завдань. Зокрема необхідно було:

1. Провести аналіз існуючих приладових систем вимірювання кутів та систематизувати відомі підходи щодо підвищення точності та швидкодії для використання отриманих результатів при побудові прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК);
2. Запропонувати сукупність принципів для побудови ППСВК з підвищеною точністю та швидкістю;
3. Оновити математичну модель похибки ППСВК, яка системно враховує особливості її складових для подальшого використання при корекції результатів вимірювання;
4. Розробити підхід до визначення необхідної кількості спостережень при багаторазових вимірюваннях, що корелює із заданою точністю та використовується при нормуванні випадкових складових похибок вимірювання кутів;
5. Розробити штучні нейронні мережі (ШНМ) для функціонування ППСВК з огляду необхідності автоматичного аналізу інформації та її обробки для підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів;
6. Розвинути метод ковзного середнього щодо фільтрації вихідного сигналу ППСВК для зменшення флуктуацій та підвищення точності вимірювання;
7. Розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що реалізує автоматизоване функціонування ППСВК, та рекомендації щодо його практичного використання;

8. Впровадити результати роботи у виробництво та у навчальний процес університету.

При цьому наукове дослідження проводилось за наступним *планом*:

ПЛАН

1. Аналіз інформаційних джерел в галузі вимірювання величин плоских кутів

1.1. Вимірювання величин плоских кутів



1.1.1. Вимірювання величин плоских кутів об'єктів виробництва гнучких автоматизованих виробництва приладо- та машинобудування

1.1.2. Вимірювання величин робочих кутів багатогранних призм

1.1.3. Задача вимірювання величин плоского кута попередньої виставки навігаційних чутливих елементів (НЧЕ)

1.2. Аналіз факторів, що впливають на появу похибок вимірювання величини плоского кута попередньої виставки навігаційних чутливих елементів

1.2.1. Аналіз впливу методу опису орієнтуючих рухів НЧЕ при їх попередній виставці

1.2.2. Аналіз впливу інструментальних похибок засобів кутових вимірювань на точність виставки НЧЕ

1.2.3. Аналіз впливу методів проведення вимірювань та обробки отриманих результатів на точність виставки НЧЕ

1.2.4. Аналіз впливу оператора на точність виставки НЧЕ

1.2.5. Загальні рекомендації щодо зменшення похибки вимірювання величини плоского кута

1.3. Аналіз та загальна характеристика відомих сучасних методів та засобів вимірювання величин плоских кутів

1.3.1. Загальний аналіз відомих сучасних засобів вимірювання величин плоских кутів

1.3.2. Гоніометри як основна складова сучасної прецизійної кутовимірювальної техніки

1.3.3. Перетворювачі кута

1.4. Постановка наукової проблеми, мета та задачі роботи

Висновки до розділу

2. Розробка моделі прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1. Формулювання принципів побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.1 Принцип модульності побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.2 Принцип інваріантності (гнучкості) побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.3 Принцип автоматизованості прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.4 Принцип ієрархічності побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.5. Принцип агрегування (комплексування) прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.6. Принцип структурованості прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.7. Принцип системності прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.8. Принцип цілісності прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.9. Принцип ємерджентності прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.10. Принцип декомпозиції та композиції прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.1.11. Принцип результативності (завершеності) прецизійної приладової системи вимірювання кутів



2.1.12. Принцип синергетичної інтеграції прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2. Побудова системної моделі прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2.1. Структурна модель прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2.2. Інформаційна модель прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2.3. Декомпозиція організаційної моделі прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2.3.1. Датчик кута прецизійної приладової системи вимірювання кутів

2.2.3.2. Фотоприймач КМОП-матриця

2.2.3.3. Штучна нейронна мережа

Висновки до розділу

3. Розробка математичної моделі похибки прецизійної приладової системи вимірювання кутів

3.1. Аналіз відомої математичної моделі похибки автоматизованого прецизійного пристрою для вимірювання кутів

3.2. Аналіз похибки фоточутливої КМОП-матриці

3.3. Аналіз впливу швидкості обертання Землі на похибки вимірювання кутів

3.4. Математична модель похибки прецизійної приладової системи вимірювання кутів

3.5. Шляхи зменшення похибок прецизійної приладової системи вимірювання кутів

3.6. Розробка підходу щодо визначення кількості багаторазових вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання кутів ППСВК

3.6.1. Опис методики визначення оптимальної кількості вимірювань при нормуванні випадкової складової похибки вимірювання прецизійною приладовою системою вимірювання кутів

3.6.2. Результуючі етапи методики визначення оптимальної

кількості вимірювань

3.6.3. Аналіз ефективності застосування пропонованого підходу визначення кількості вимірювань за методикою визначення оптимальної кількості вимірювань

Висновки до розділу



4. Розробка архітектур штучних нейронних мереж прецизійної приладової системи вимірювання кутів

4.1. Сутність проблеми декомпозиції (розпізнавання) систематичних та випадкових складових похибок вимірювання у результатах спостережень при багаторазових вимірюваннях

4.2. Методи визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції

4.2.1. Аналітично-розрахунковий метод визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера

4.2.2. Методи автоматичного визначення складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції

4.3. Загальні етапи синтезу штучних нейронних мереж

4.4. Обґрунтування вибору архітектури штучної нейронної мережі

4.5. Розробка штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції

4.5.1. Побудова структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції

4.5.2. Формування навчальної множини для навчання штучної нейронної мережі автоматичного визначення складових похибок вимірювання

4.5.3. Практична реалізація та навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання

4.5.4. Оптимізація структури штучної нейронної мережі

автоматичного визначення складових похибок вимірювання

4.6. Розробка штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів для визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів

4.6.1. Побудова структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

4.6.2. Формування навчальної множини для навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

4.6.3 Практична реалізація та навчання штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

4.6.4. Оптимізація структури штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

Висновки до розділу

5. Експериментальні дослідження штучних нейронних мереж прецизійної приладової системи вимірювання кутів. згладжування та фільтрація випадкових процесів, що впливають на появу та величину випадкової похибки



5.1. Методика експериментального дослідження похибок штучних нейронних мереж

5.2. Експериментальне дослідження похибок штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання за принципом їх декомпозиції

5.3. Експериментальне дослідження похибок штучної нейронної мережі автоматичного розпізнавання хімічних елементів

5.4. Фільтрація вихідних сигналів КМОП-матриці за методом ковзних середніх

5.5. Опис алгоритму функціонування запропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів

5.6. Опис програмного забезпечення функціонування запропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів

Висновки до розділу

6. Дослідження параметрів кільцевого лазера прецизійної приладової системи вимірювання кутів

6.1. Аналіз похибок кільцевого лазера як складової запропонованої прецизійної приладової системи вимірювання кутів

6.2. Дослідження дрейфу масштабного коефіцієнта кільцевого лазера

6.3. Дослідження дрейфу нуля вихідної характеристики кільцевого лазера

6.4. Стабілізація параметрів кільцевого лазера

Висновки до розділу

Висновки та основні результати роботи



Метод дослідження – це спосіб отримання збору, обробки або аналізу даних.

Як правило у наукових дослідженнях широко застосовуються різні методи наукового пізнання з інших областей науки і техніки. З одного боку, це явище можна вважати позитивним, так як воно дає можливість вивчити досліджувані питання комплексно, розглянути різноманіття зв'язків і відносин, з – інший ця різноманітність ускладнює вибір методів, які відповідають конкретному дослідженню.

Основним орієнтиром для вибору методів дослідження можуть служити завдання наукового дослідження. Саме поставлені завдання визначають способи їх вирішення і, відповідно, вибір відповідних методів дослідження.

У практиці проведення наукових досліджень у технічних та природничих галузях, найбільшого поширення набули такі методи:

- системного аналізу;
- теорії ймовірності та математичної статистики;
- теорії множин;
- дискретної та обчислювальної математики;
- комп'ютерного моделювання.

Останнім часом набувають поширення методи штучного інтелекту, що показали свою ефективність при проведенні наукових досліджень.



ПРИКЛАД. В науковому дослідженні за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” [4] методи наукових досліджень базуються на застосуванні фізичних явищ лазерної спектроскопії, фізичних принципів роботи напівпровідникових фоточутливих елементів, нейромережових технологій, теорії ймовірності та математичної статистики, методів системного підходу, теорії множин, дискретної та обчислювальної математики, а також комп’ютерного моделювання.

Етап V. Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Як вказувалось раніше, тема наукового дослідження має бути актуальною та відповідати пріоритетним і стратегічним напрямкам інноваційної діяльності. В Україні пріоритетні і стратегічні напрями інноваційної діяльності визначаються Законом України №3715-VI “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні”. Тому, наукову роботу доцільно виконувати у рамках дослідницької та науково-методичної роботи дослідних інститутів, університетів та їх підрозділів (кафедр, лабораторій).

Наприклад, стратегічними пріоритетними напрямами інноваційної діяльності в Україні на 2011-2021 рр. в відповідно до Закону України є наступні:

1) освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії [6];

2) освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки [6];

3) освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх оброблення і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій [6];

4) технологічне оновлення та розвиток агропромислового комплексу [6];

5) впровадження нових технологій та обладнання для якісного медичного обслуговування, лікування, фармацевтики [6];

6) широке застосування технологій більш чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища [6];

7) розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки [6].



ПРИКЛАД. Наукове дослідження за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” [4] виконано у рамках дослідницької та науково-методичної роботи кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Житомирського державного технологічного університету (перейменованого у 2019 р. в Державний університет “Житомирська політехніка”) відповідно до Закону України №3715-VI “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні”, статті 4 “Стратегічні пріоритетні напрями інноваційної діяльності на 2011-2021 роки”, зокрема за напрямками “Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки” та “Розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки”, а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідних роботах № 33 “Наукові основи та фундаментальні дослідження приладової системи для вимірювання механічних величин з цифровими відео зображеннями” (0112U001793, 2014 р.), № 48 “Теорія дослідження температурного поля біопалива нового термоанемометричного витратоміра з використанням алгоритмічних методів, апарату штучних нейронних мереж” (номер державної

реєстрації 0114U000545, 2017 р.), № 2019 “Система керування навігаційного комплексу стабілізатора озброєння легких броньованих машин” (номер державної реєстрації 0117U000405, 2017 р.).

Етап VI. Організація та проведення дослідження.

На цьому етапі проводяться роботи направлені на організацію та проведення експериментальних досліджень, комп’ютерного моделювання. Ці роботи направлені на визначення послідовності всіх етапів процесу наукового дослідження з підготовкою всіх умов, що забезпечують його повноцінне виконання. Такі роботи включають підготовку відповідних умов, приладів, засобів, інструктаж помічників, планування спостереження, вибір експериментальних і контрольних груп, оцінка всіх особливостей експериментальної бази і т.д..

Крім того для забезпечення достовірності наукових результатів повинні обиратися апробовані методи досліджень, програмні засоби, проводитись комп’ютерне моделювання. Підтвердженням достовірності наукових результатів дослідження є співпадіння теоретичних, експериментальних результатів та досліджень на комп’ютері

Етап VII. Обробка результатів дослідження.

Зміст та сенс наукового дослідження, а також його цінність визначаються отриманими результатами, що мають *наукову новизну* та *практичне значення*.



Науковий результат – це продукт наукової діяльності, отриманий на основі застосування деякого науково-методичного апарату, що задовольняє вимогам новизни, достовірності та корисності [3].

Наукова новизна стосовно дисертаційного дослідження – це ознака, наявність якої дає автору право на використання поняття “вперше” при характеристиці отриманих ним результатів і проведеного дослідження в цілому [7, 8]. Поняття “вперше” означає в науці факт відсутності подібних

результатів до їх публікації [7, 8]. Необхідно показати відмінність одержаних результатів від відомих раніше. Ступінь новизни описується словами “вперше одержано”, “удосконалено”, “дістало подальший розвиток” [9].

Усі наукові положення з урахуванням досягнутого ними рівня новизни є теоретичною основою (фундаментом) вирішеної в дисертації наукової задачі або наукової проблеми. Насамперед за це здобувачеві присуджується науковий ступінь [9].



ПРИКЛАД. *Наукова новизна* одержаних результатів у науковій роботі за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів” полягає в наступному:

1. Вперше з єдиних системних позицій сформульовані загальні принципи побудови прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК) як багаторівневої сукупності різних за призначенням та функціонуванням технічних засобів з неоднорідними властивостями, що полягають у формуванні функціональних відношень між параметрами її рівнів та всередині них з врахуванням прийнятого системного підходу. Це дало можливість здійснити синергетичну інтеграцію та реалізацію пропонованих методів (обробки вимірювальної інформації) та засобів (штучних нейронних мереж (ШНМ), КМОП-матриці) [4];
2. Вперше за принципами синергетичної інтеграції та емерджентності, шляхом застосування фоточутливої матриці на компліментарних структурах метал-окисел-напівпровідник (КМОП-матриці) та ШНМ побудовано ППСВК із розширеними функціональними можливостями (безконтактного вимірювання кутів та експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу для визначення хімічного складу металовмісних матеріалів) [4];
3. Вдосконалено математичну модель похибки ППСВК у частині врахування похибки фоточутливої КМОП-матриці шляхом введення флуктуаційних напруг, які виникають на пікселях матриці



через дробовий ефект та при тепловому русі зарядів відповідно, що у результаті дає можливість підвищити точність вимірювання ППСВК [4];

4. Вперше запропоновано новий підхід до автоматичного розпізнавання систематичних та випадкових складових похибок вимірювання кутів, який базується на використанні ШНМ на етапі аналізу та обробки вимірювальної інформації, експрес-аналізу складових похибок вимірювання за принципом декомпозиції, що дозволило підвищити точність та швидкодію обробки вимірюваної інформації у 1,3 рази [4];

5. Вперше запропоновано використання ШНМ для експрес-аналізу інтенсивностей спектрального розподілу хімічних речовин, що дало принципову можливість проводити автоматичне визначення їх вмісту у складі металовмісних матеріалів у режимі реального часу зі швидкодією 2,5 с [4];

6. Вперше проведено визначення складових похибок вимірювання кутів на ПК з використанням ШНМ, що дало принципову можливість автоматизувати процес обробки вимірювальної інформації, а також проводити експрес-аналіз складових похибок вимірювання у режимі реального часу зі швидкодією 2 с [4].

Порівняння результатів комп'ютерного моделювання процесу визначення складових похибок вимірювання кутів для багатогранних призм, які використовуються для регулювання і настройки кутомірних приладів і безпосереднього вимірювання кутів промислових виробів з використанням двох підходів – застосування ШНМ та дисперсійного аналізу за критерієм Фішера, вказало на переважність ШНМ щодо швидкодії порівняно з традиційно використовуваним критерієм [4];

7. Вперше запропоновано підхід щодо визначення кількості вимірювань, що дозволяє обґрунтовано визначити необхідну кількість вимірювань кутів ППСВК, яка є достатньою для досягнення заданої точності [4].

У результаті експериментально доведено, що запропонований метод дозволяє підвищити швидкодію (у 1,3 рази або на 25 %) вимірювань кутів порівняно із відомими [4].



Важливо знати, що науковою новизною не можуть бути прикладні (практичні) результати, отримані у вигляді способів, пристроїв, методик, схем, алгоритмів тощо. [9].

Окрім наукової новизни, результати наукових досліджень повинні мати *практичну цінність* (значення).

В дисертації, що має теоретичне значення, треба подати відомості про наукове використання результатів досліджень або рекомендації щодо їх використання, а в дисертації, що має прикладне значення, – відомості про практичне застосування одержаних результатів або рекомендації щодо їх використання [9].

Відзначаючи практичну цінність одержаних результатів, необхідно подати інформацію щодо ступеня готовності до використання або масштабів використання. Необхідно дати короткі відомості щодо впровадження результатів досліджень із зазначенням назв організацій, в яких здійснена реалізація, форм реалізації та реквізитів відповідних документів [9].



ПРИКЛАД. *Практичне значення одержаних результатів у науковій роботі за темою “Прецизійна приладова система вимірювання кутів”* визначається її спрямованістю на підвищення точності та швидкості вимірювання кутів [4]. Практичними результатами є наступні:

1. Доопрацьована конструкція широкозастосовуваної гоніометричної системи ГС1Л шляхом введення КМОП-матриці та ШНМ, що дозволяє проводити безконтактні вимірювання кутів та здійснювати відповідні інженерні розрахунки при обробці результатів вимірювання з більшою точністю та швидкодією [4];

2. Розроблено конструкцію ППСВК на основі ШНМ та фоточутливої КМОП-матриці. Це дозволило розширити функціональні можливості

ППСВК порівняно із відомими в частині експрес-аналізу хімічних елементів у металовмісних матеріалах за методом емісійного спектрального аналізу залежностей спектральних ліній від вмісту хімічних елементів у матеріалах [4];

3. Розроблено метод визначення систематичних та випадкових складових похибок вимірювання на основі ШНМ, що дає можливість зосередити зусилля користувачів на виборі вірного методу їх обробки, нормування, та компенсації відповідно до вимог, що регламентуються нормативними документами [4];

4. Новизну пропонованих технічних рішень підтверджено двома патентами України на корисну модель № 57135 та 127373, використання змісту яких, дозволяє розв'язувати задачі вимірювання кутів з підвищеними точністю та швидкістю [4].

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах ПАТ “НВО “Київський завод автоматики”, у навчальний процес в Житомирському державному технологічному університеті при викладанні дисциплін “Основи метрології”, “Технологічні вимірювання та прилади”, “Технології штучного інтелекту”, “Планування, моделювання та верифікація процесів у ГВС”, що підтверджено відповідними актами та довідками [4].



Етап VIII. Формулювання висновків.

Рішення кожного поставленого завдання повинно бути певним чином відображено у висновках.

Висновки – це твердження, що виражають в стислій формі підсумки дослідження. Висновки пишуться у тезисній формі і відображають те нове, що отримано власне автором. Розповсюдженою помилкою є те, що при написанні висновків автор включає в них загальноприйняті в науці положення, які вже не потребують доказів.



Важливо підкреслити, що у висновках викладають найбільш важливі

наукові та практичні результати, одержані в дисертації, які повинні містити формулювання розв'язаної наукової проблеми (задачі), її значення для науки і практики. Далі формулюють висновки та рекомендації щодо наукового та практичного використання здобутих результатів. У першому пункті висновків коротко оцінюють стан питання. Далі у висновках розкривають методи вирішення поставленої в дисертації наукової проблеми (задачі), їх практичний аналіз, порівняння з відомими розв'язаннями. У висновках необхідно наголосити на якісних та кількісних показниках здобутих результатів, обґрунтувати достовірність результатів, викласти рекомендації щодо їх використання [9].

Етап ІХ. Оформлення роботи.

Оформлення роботи – це заключний етап виконання наукового дослідження, що передбачає представлення отриманих результатів дослідження в загальнодоступній і зрозумілій формі, що дозволяє порівнювати їх з результатами інших дослідників і використовувати в практичній діяльності.

1.3. Представлення результатів наукових досліджень

Отримані результати та наукові положення наукового дослідження повинні бути достатньо повно представлені широкому колу шляхом їх публікації у наукових працях статтях у наукових журналах за фахом та тезах, а також апробовані на науково-технічних та науково-практичних конференціях і семінарах різного рівня, зокрема, міжнародних, всеукраїнських, університетських.

2. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

2.1. Зміст системного аналізу та системного підходу

Методологічною основою багатьох наукових досліджень виступає системний аналіз та системний підхід, що є надскладними але потужними інструментами дослідження складних багаторівневих, ієрархічних об'єктів, що самоорганізуються та розвиваються, наприклад, складних технічних систем, людино-машинних систем, соціальних систем тощо. Системний аналіз та системний підхід успішно використовується при вирішенні таких надскладних задач як розробка засобів представлення досліджуваних та конструйованих об'єктів; побудова узагальнених моделей систем, їх класів і специфічних властивостей систем; дослідження структур систем і системних концепцій їх розробок тощо. Загалом системний аналіз, як наука сформувався в результаті виникнення необхідності у дослідженні, проектуванні та управлінні складними системами в умовах неповноти, обмеженості та дефіциту інформації, ресурсів, часу. Він є розвитком низки таких наукових дисциплін як філософія, теорія систем, теорія прийняття рішень, теорія автоматичного та оптимального управління, експертний аналіз, системотехніка, кібернетика та ін., що на сьогоднішній день є базою та методологічною основою системного аналізу. Системний аналіз використовує як філософсько-методологічні уявлення так і формалізовані методи і моделі цих дисциплін. Широке поширення методів системного аналізу та їх успішне застосування в практичній діяльності стало можливим з розвитком та впровадженням комп'ютерної техніки та інформаційних технологій, адже сучасний системний аналіз розвивається як напрямок досліджень систем, що складно формалізуються, у яких присутня невизначеність. Очевидно, що вказане ускладнює прийняття рішень. В таких умовах успішно застосовуються технології штучного інтелекту, що є базою сучасних інформаційних систем (рис. 2.1).



Рис. 2.1.

Цікаво, що науковий апарат, методи і підходи системного аналізу в загальних рисах сформувалися в США на початку 40-х рр. XX ст. у ході пошуку нових підходів до вирішення складних виробничих проблем оборонної промисловості, що були викликані другою світовою війною [10] та спонукали до необхідності досліджень, проектуванні та управлінні виробництвами, як складними системами, в умовах неповноти, обмеженості та дефіциту інформації, ресурсів, часу. В таких умовах була потреба розгляду багатьох проблем та шляхів їх вирішення, тобто альтернатив, що описувалися великою кількістю різних змінних як єдине ціле, забезпечуючи при цьому повноту оцінки кожної альтернативи і рівень її невизначеності.

У результаті була отримана універсальна методологія рішення проблем, що отримала назву “системний аналіз”. Причому більшість методів, що використовувались при цьому було розроблено задовго до появи системного аналізу і використовувалися самостійно при вирішенні локальних, порівняно не складних задач.

В результаті методи і підходи використані для вирішення означених вище проблем в наступному склали методологічну базу системного аналізу. А

отримані результати виступили підґрунтям для нової концепції організації військових підприємств США як гнучких комп'ютерно-інтегрованих систем (ГКІС). Концепція ГКІС, довівши свою ефективність та постійно вдосконалюючись і доповнюючись, отримала широке розповсюдження в різних галузях промисловості США та Європи. На сьогодні концепція ГКІС перетворилася в глобальну бізнес-стратегію забезпечення ефективності бізнес-процесів за рахунок інформаційної інтеграції та спільного використання комп'ютерної техніки, засобів автоматизації, інформаційних технологій та методів системного аналізу у загальній системі, що використовується на всіх етапах життєвого циклу продукції. На даний час в світі діють більше 25 національних організацій, які координують питання розвитку принципів та технологій ГКІС, в тому числі в США, Канаді, Японії, Великобританії, Німеччині, Швеції, Норвегії, Австралії. Розвиток концепції ГКІС зумовив появу нової організаційної форми виконання масштабних проектів, пов'язаних з дослідженням, розробкою, виробництвом і експлуатацією складних систем.

Системний аналіз на сьогодні перетворився в самостійну, унікальну за своїм призначенням і характером наукову і прикладну дисципліну і область професійної діяльності. Він об'єднує досягнення багатьох споріднених і суміжних областей і різних підходів та узагальнює різні методи за допомогою системної концепції [10] використовуючи принципи системного підходу.

Сутність системного підходу полягає в тому, що проблема або система розглядається як деяке ціле, що складається із частин і елементів, які володіють цілісним характером виконуваних функцій.

При чому, як відомо, проблеми діляться за ступенем їх структуризації на три класи: *структуровані*, *слабо структуровані*, *неструктуровані* [10].

Проблеми, для яких залежності між змінними можуть бути представлені безпосередньо в числовій формі або формалізовані таким чином, що можна привести їм у відповідність їх чисельні оцінки, визначаються як *структуровані* (або кількісно сформульовані) [10]. Для вирішення структурованих проблем, що виникають при дослідженні складних систем можливе використання математичних засобів для яких накопичено достатній теоретичний і практичний досвід.

Проблеми, які містять як якісні, так і кількісні змінні, причому якісні і невизначені аспекти проблеми мають тенденцію посилюватися, називають *слабо структурованими*. Для них характерні нечіткість, багатоваріантність і наближений вигляд опису [10].

Проблеми, що містять лише перелік обумовлюють їх змінних, кількісні залежності між якими не визначені, називають *неструктурованими* (якісно вираженими) [10].

Системний аналіз застосовується для вирішення слабо структурованих проблем, у постановці яких багато неясного і невизначеного, і тому їх неможливо уявити в повністю математизованому вигляді. Предметом системного аналізу є переважно системи, процеси та явища, для яких немає можливості вичерпно та несуперечливо описати її елементи, підсистеми і систему в цілому на формальному рівні, аналітично, використовуючи системи рівнянь або нерівностей. Іншими словами, для системного аналізу типовою є ситуація, коли не вдається побудувати чисто математичну модель об'єкта дослідження на будь-якому рівні – елемента системи, підсистеми або системи в цілому [10].

Зауважимо, що для вирішення неструктурованих проблем зазвичай системний аналіз застосовується з евристичними (інтуїтивно-логічними) методами [10] та технологіями штучного інтелекту, що дозволяє звести ці проблеми до слабо структурованих.

2.2. Теоретичні основи системного аналізу та системного підходу

При проведенні наукових досліджень конче необхідно охопити широке коло задач та виконати всебічний аналіз факторів, що породжують наукову проблему та впливають на її вирішення. Корисним при цьому є застосування системного підходу та системного аналізу, особливо в умовах невизначеності та багатофакторності, що дозволяє визначити весь спектр проблем та їх межі, а також можливі рішення, оцінити їх переваги та обґрунтування.

Цікаво знати, що термін “*системний аналіз*” має дві складових. Так, поняття “*системний*” використовується виходячи з того, що дослідження будується виходячи з категорії “система”. Термін “*аналіз*” використовується для характеристики процедури дослідження, яка полягає в поділі складної макропроблеми на окремі мікропроблеми, у винайденні та використанні таких методів для їх вирішення, які надають можливість синтезувати загальне рішення проблеми у цілому. Таким чином “системний аналіз – це аналіз на основі глибинного та ретельного вивчення властивостей системи із застосуванням різних наукових підходів, для виявлення слабких і сильних сторін цієї системи, можливостей і загроз, формування стратегії функціонування і розвитку” [11, с. 151].



Виходячи із вище наведеного, доцільно навести наступні визначення системного аналізу як такого.

Системний аналіз – це комплекс методологічних засобів, що застосовуються для підготовки, аргументування та обґрунтування рішень складних багатофакторних проблем [10].



Системний аналіз – це сукупність наукових методів і практичних прийомів, що використовуються для дослідженні та / або розробці складних і надскладних об'єктів, а також при вирішенні різноманітних проблем, що виникають у всіх сферах наукової діяльності, управління соціальними та організаційно-технологічними системами [10].



Системний аналіз – це сукупність методів і засобів вироблення, прийняття і обґрунтування оптимального рішення з багатьох можливих альтернатив управління складними системами.



Системний аналіз використовує як кількісні методи так і інтуїтивно-евристичний підхід підґрунтям якого є професіоналізм та досвід дослідника. При цьому найбільш цінним результатом системного аналізу є не кількісно

визначене рішення проблеми, а збільшення ступеня розуміння цієї проблеми та сутності шляхів її вирішення. В цілому суть системного аналізу полягає у представленні наукової проблеми, досліджуваного об'єкту, вирішуваних задач будь-якої природи та ступеня складності у вигляді деякої системи. Таким чином методологічною основою наукових досліджень є системний підхід та системний аналіз.

Системний підхід орієнтований на встановлення цілісності об'єкту (процесу, проблеми, предмета, явища) дослідження та його розгляд як системи з багатогранними зв'язками.



Цікаво знати, що категорія “*системний підхід*” містить два терміни – “*системний*” і “*підхід*”. Зміст терміну “*підхід*” полягає в тому, що мова йде про такий напрямок розгляду об'єкта (проблеми, предмета, процесу, явища) який реалізовує систему методології його дослідження. Для кожної такої предметної області підхід повинен мати певні особливості. *Підхід* – це ракурс дослідження, його вихідна позиція, відправна точка, з якої починається дослідження і яка визначає його спрямованість [10].

Крім *системного* виділяють *аспектний* і *концептуальний підходи*. *Аспектний підхід* полягає у виборі окремого аспекту проблеми, що обумовлюється актуальністю або обмеженістю ресурсів (часових, фінансових, інтелектуальних тощо) дослідження. Зокрема, наприклад, проблема розвитку інформаційної системи може мати економічний аспект, соціально-технічний і т.д. *Концептуальний підхід* передбачає попередню розробку концепції дослідження [10], тобто певного комплексу (системи) взаємопов'язаних поглядів на об'єкт (проблему, предмет, процес, явище), певного способу його розуміння та трактування.



Системний підхід – це метод формування принципів, положень, понять, способів представлення та дослідження об'єкта (проблеми, предмета, процесу, явища), який розглядається як деяке єдине ціле (система) з внутрішніми та зовнішніми функціональними

взаємозв'язками щодо інших об'єктів, які у сукупності утворюють деяку макросистему.

Системний підхід передбачає розгляд будь-якого об'єкта як сукупність взаємопов'язаних між собою та зовнішнім середовищем елементів (підсистем), тобто як систему, що має визначену мету, вхідні та вихідні канали та зворотній зв'язок [10].

Таким чином, використання системного підходу передбачає представлення досліджуваного об'єкта у вигляді системи. Представляючи деякий об'єкт як систему, його розчленовують на просторово-обмежені частини (елементи) і визначають відносини цих частин в цілісній картині явища. Подання досліджуваного об'єкта як системи дозволяє досліджувати його більш комплексно, всебічно. Виявити всі елементи, які впливають на функціонування об'єкту, всі взаємозв'язки між елементами, а також зовнішні фактори, що впливають на функціонування об'єкту [10].

Кінцевою метою системного аналізу та системного підходу є вирішення певної проблеми / проблем. Важливе місце в системному аналізі займає проблема прийняття оптимального рішення. Наприклад, в даний час науковцям та інженерам доводиться вирішувати множину завдань щодо прийняття оптимальних рішень при управлінні різними складними системами, оптимальному синтезі, проектуванні тощо. Адже на сьогодні розвиток техніки досяг такого рівня, при якому створення просто працездатної конструкції нового виробу вже не задовольняє провідні галузі. Необхідно забезпечити найкращі показники створюваних об'єктів за низкою характеристик, наприклад, досягти максимальної швидкодії, мінімальних габаритних розмірів, нижчої вартості тощо при збереженні всіх інших вимог в заданих межах. Таким чином виникає проблема створення не просто працездатного об'єкту, а створення оптимального проекту в цілому. Аналогічні міркування справедливі і для інших видів науково-практичної діяльності. Наприклад, при організації функціонування підприємства формулюються вимоги щодо максимізації ефективності його діяльності, надійності роботи обладнання, оптимізації стратегій обслуговування систем, розподілу витрат ресурсів і т.п. При

чому у різних галузях діяльності виникають ситуації, коли потрібно приймати рішення, для яких не вдається повністю визначити всі умови. В такому випадку формування рішення буде відбуватися в умовах невизначеностей різної природи. Один з найпростіших видів невизначеності – невизначеність, неповнота, зашумленість вхідної інформації. Це проявляється, в першу чергу, при впливі на систему різних систематичних та випадкових факторів які називають збуреннями або флуктуаціями.

2.3. Система як об'єкт дослідження

У системному аналізі та системному підході виділяють поняття *складної системи*. Власне поняття *система* має надзвичайно широку сферу застосування, тому, що практично будь-який об'єкт може бути розглянутий як система.



Цікаво, що первісно під системою розумілось дещо, що має певний порядок. В античній філософії термін “система” пов'язували вже із впорядкованістю і цілісністю об'єктів природи. З'явилася концепція системи світу – утворення зі своєю організацією, ієрархією, іманентністю, структурою і закономірностями. Таке розуміння системи застосовували тільки до матеріальних об'єктів: організмів, пристроїв, об'єктів природи, Всесвіту в цілому. Пізніше, у середні віки, принцип системної організації був перенесений і на науку.

У наш час термін “система” широко використовується в науковій літературі і повсякденному житті і має безліч значень [10].



Так з точки зору права *система* – це сукупність сталих норм життя та правил поведінки.

В даному випадку йдеться про деякі нормативно-правові системи, які властиві різним сферам життя людей і суспільств, що виконують регулятивну функцію в суспільстві [43]. Наприклад, до таких систем відносять законодавчу систему, морально-правову систему та інші.



Соціальний аспект дозволяє визначити поняття **система** – як деяке **явище суспільства** (наприклад, економічна система, правова система, політична система).

Соціальне вживання терміну система зумовлено несхожістю та різноманітністю людських суспільств, формуванням їх складових – правової, управлінської, соціальної та інших систем [43]. Наприклад, до таких систем відносять законодавчу систему, морально-правову та інші.



Натуралістичне (природознавче) вживання терміна **система** - це **сукупність об'єктів природи** (наприклад, Сонячна система) [43].

Аналізуючи широту вживання та різноманітність тлумачень поняття “**система**” можна говорити про його неоднозначність та креативність, що відповідним чином відображається у фундаментальній інженерній дисципліні, яка вивчає складні системи довільної природи та називається **системологією**. Системний підхід у загальному та системологія в окремому випадку є універсальним методом вивчення та дослідження складних систем різної фізичної природи, що робить знання та застосування у науковій практиці системного підходу та системного аналізу у сукупності із сучасними інформаційними технологіями надзвичайно ефективним та продуктивним.

Узагальнюючи наведене доцільно тлумачити поняття системи наступним чином.



Система – це організаційне складне ціле, що утворене для виконання конкретної мети та складається з множини елементів, розташованих в певному порядку і функціонально взаємодіючих між собою за допомогою відносин і зв'язків.

Найважливішими властивостями системи є

- структурованість, тобто будь-яка система має певну структуру;
- функціональний взаємозв'язок із середовищем;
- ієрархічність, тобто система має структурні елементи (підсистеми);
- множинність описів, тобто різноманітність способів представлення її

структури – формалізований опис, інформаційні (семантичні) та структурні моделі тощо.



Під **структурою** системи розуміють сукупність елементів та / або підсистем і зв'язків між ними (рис. 2.1).



Під **елементом системи** прийнято розуміти її найпростішу неподільну частину.

Ступінь розчленування системи на елементи залежить від конкретного завдання і поставленої мети, а також її уточнення в процесі дослідження (рис. 2.1).

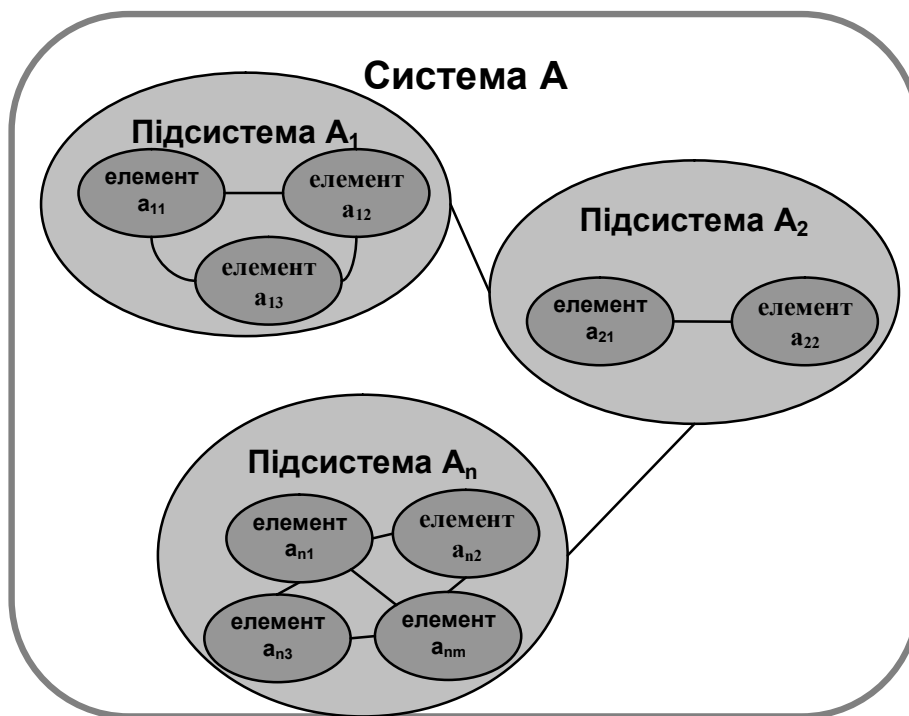


Рис. 2.1. До ілюстрації потужності складових множини (системи) A

Множину елементів A системи або підсистеми із застосуванням математичного апарату теорії множини можна представити наступним чином:

$$A = (a_i | i = \overline{1; I}),$$

де A – множина елементів системи;

a_i – окремий i -ий елемент системи;

i – порядковий номер елемента системи;

I – кількість елементів у системі.



Систему розділяють на елементи послідовним розчленуванням на **підсистеми**, що є більш крупними структурами системи ніж елементи.

Поділ системи на підсистеми пов'язаний із виокремленням сукупностей взаємопов'язаних елементів, здатних виконувати відносно незалежні функції, що спрямовані на досягнення спільної для всієї системи мети.

Терміном “**підсистема**” підкреслюється, що така частина системи має властивості системи, зокрема володіє властивістю цілісності – має структуру, ієрархічність, взаємозв'язок (див. рис. 2.1).

На рис. 2.1 зображена система (множина) A , що складається із підсистем (підмножин) A_1, A_2, \dots, A_n , кожна з яких в свою чергу є множиною, що складається відповідно із елементів $a_{11}, a_{12}, a_{13}; a_{21}, a_{22}; \dots, a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nm}$. В цьому випадку кажуть, що **потужність відповідних підмножин**, тобто кількість елементів, що входять до кожної із вказаних підмножин, **дорівнює відповідно 3, 2 та m** . Формально вказане можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} A &= (A_i | i = \overline{1, n}) = \\ &= ((A_{1i} | i = \overline{1, 1n}) \cup (A_{2i} | i = \overline{1, 2n}) \cup \dots \cup ((A_{ni} | i = \overline{1, nm})). \end{aligned}$$

Те ж в розгорнутому виді:

$$\begin{aligned} A &= (A_i | i = \overline{1, n}) = \\ &= ((A_{1i} | i = \overline{1, 1n}) \cup (A_{2i} | i = \overline{1, 2n}) \cup \dots \cup ((A_{ni} | i = \overline{1, nm}) = \\ &= (a_{11}, a_{12}, a_{13}) \cup (a_{21}, a_{22}) \cup \dots \cup (a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nm}). \end{aligned}$$

Використовують різні способи представлення структури системи – **графічний** у вигляді схем (рис. 2.2, рис. 2.3) та графів (рис. 2.1), **символьний** у вигляді формалізованих описів (математичних, інформаційних моделей), **матричний, табличний** тощо.

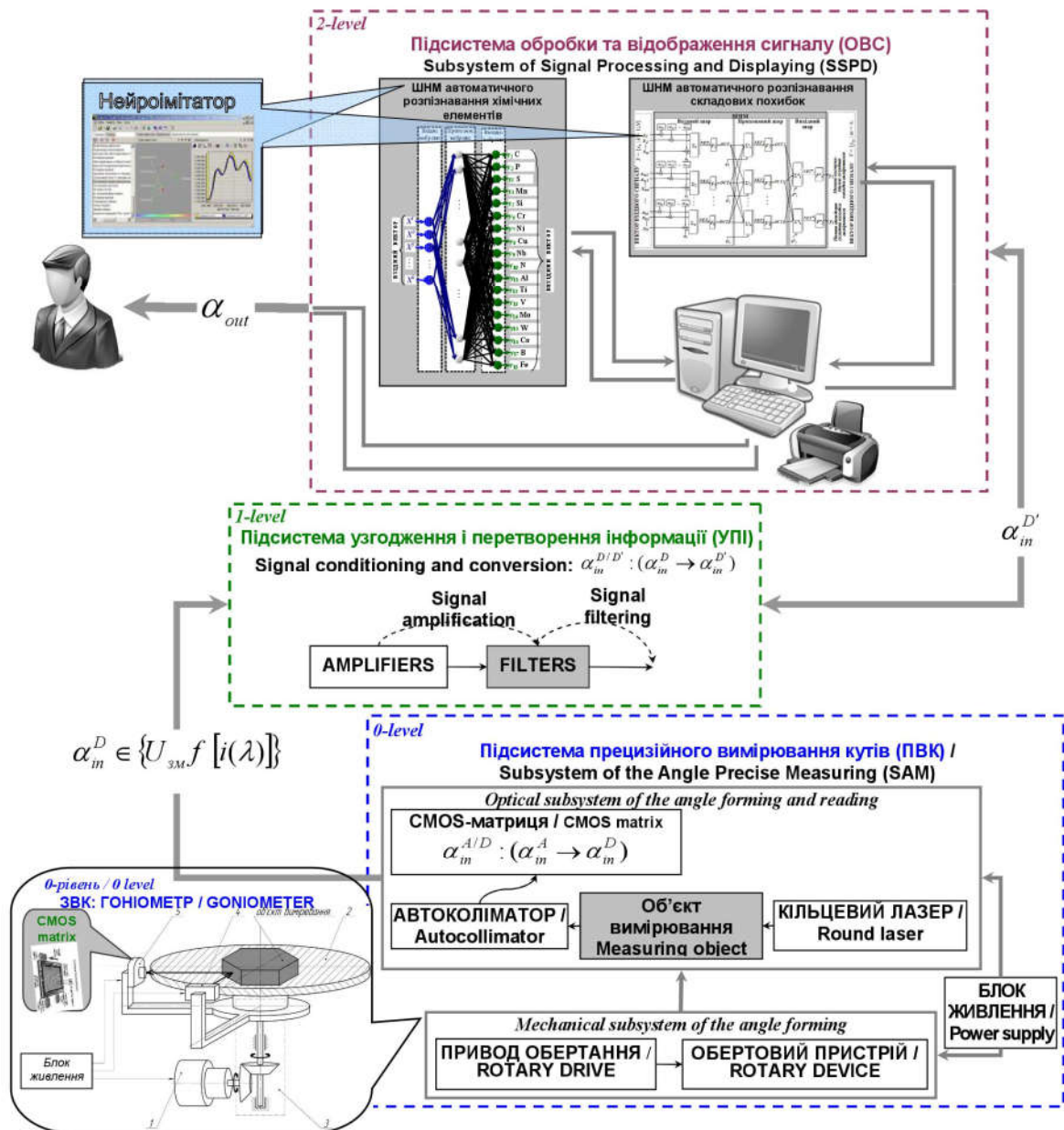


Рис. 2.2. Приклад структурної схеми приладової системи вимірювання кутів

[4]

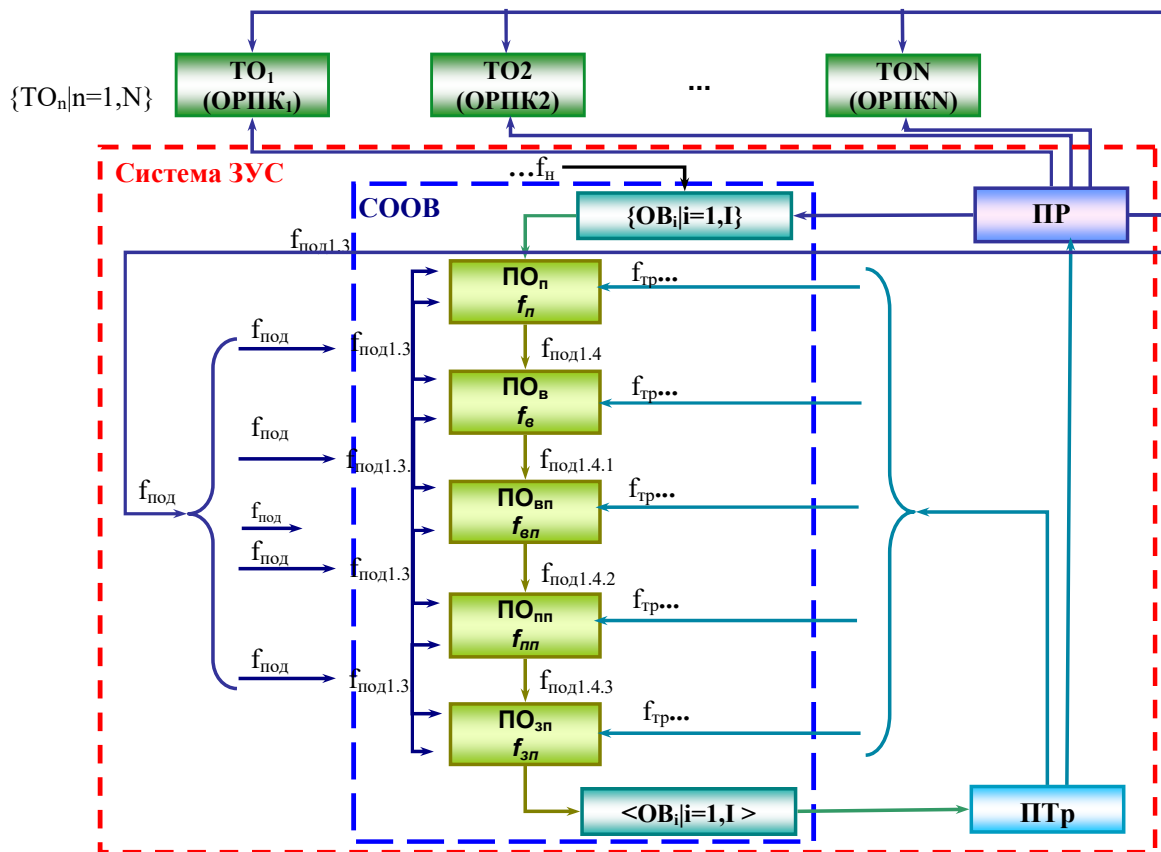


Рис. 2.3. Приклад структурної схеми роботизованого технологічного комплексу як елемента гнучкої виробничої системи із розвинуеною системою засобів упорядкування середовища: система ЗУС – система допоміжного технологічного обладнання для упорядкування виробничого середовища; СООВ – система пристроїв орієнтування для орієнтації об'єктів виробництва; ОБ – об'єкти виробництва; ПТр – пристрій транспортування; ПО – пристрої орієнтування; ПР – промисловий робот; ТО – основне технологічне обладнання (вертати) [5]

2.4. Види систем

Існує надзвичайно велика множина систем, що є різноманітними за фізичною природою, призначенням, застосуванням тощо. Вся повнота цієї різноманітності відображається класифікацією систем. Основними класифікаційними ознаками систем вважаються: природа елементів системи, походження, тривалість існування, мінливість властивостей, ступінь складності, взаємодія із середовищем, реакція на впливи, характер

поведінки і ступінь участі людей в реалізації керувальних впливів.

2.4.1. Матеріальні та абстрактні системи

Важливим є розділ систем за природою елементів на *матеріальні (фізичні)* та *абстрактні (ідеальні)* системи (рис. 4.4), що дозволяє розрізнити реальні системи і системи, які є моделями реальних. Для реальних систем є можливість побудови множини систем-моделей, що розрізняються за метою моделювання і за необхідним ступенем деталізації.

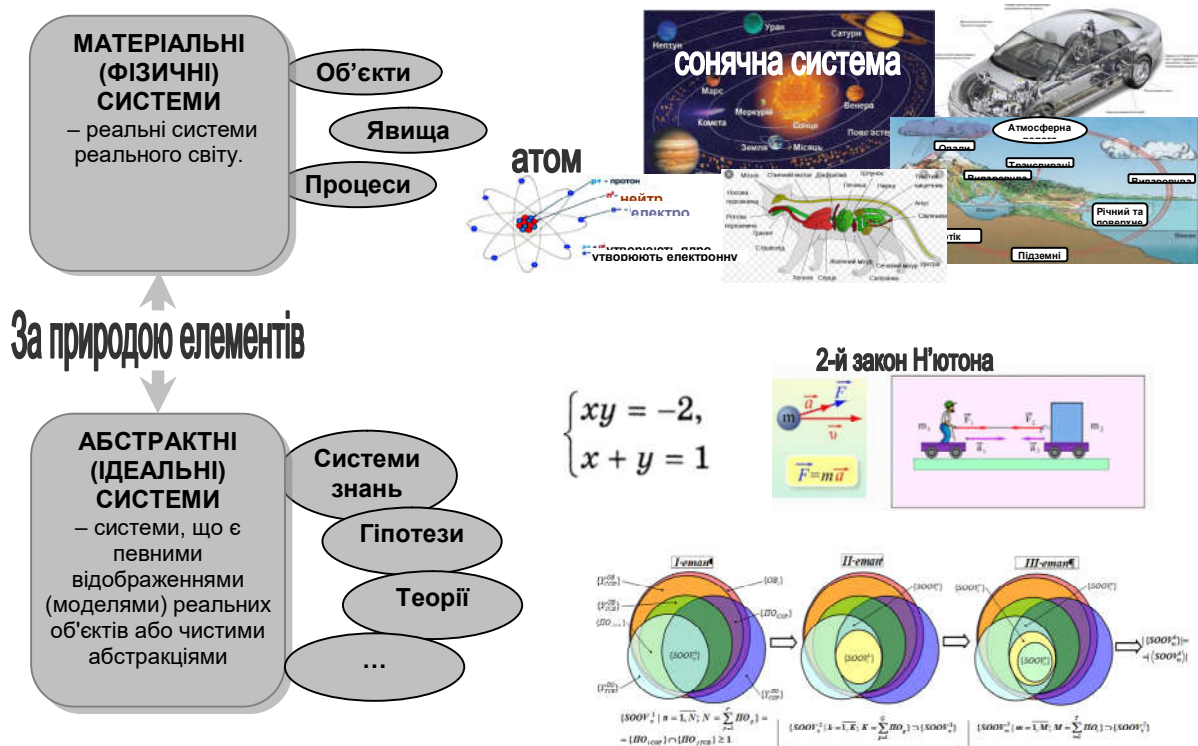


Рис. 2.4. Види систем за природою елементів

Матеріальні (фізичні) системи являють собою цілісні сукупності об'єктів різних областей реального світу і, в свою чергу, діляться на системи, що складаються з елементів неорганічної природи (фізичні, геологічні, хімічні та інші) і живі системи, куди входять як найпростіші біологічні системи, так і надскладні біологічні об'єкти типу організму, екосистеми тощо.

Абстрактні (ідеальні) системи є продуктами людського мислення, елементи яких не мають прямих аналогів в реальному світі і являють собою ідеальні об'єкти – поняття або ідеї, що пов'язані між собою. Вони

створюються шляхом уявного мислення і утворюються в результаті творчої діяльності людини. Абстрактні системи також можуть бути розділені на множину різних типів (особливі системи являють собою наукові поняття, гіпотези, теорії, системи рівнянь і тому подібні). Абстрактною системою є, наприклад, система понять тієї чи іншої науки. До абстрактних систем відносяться і наукові знання про системи різного типу, як вони формулюються в загальній теорії систем, спеціальних теоріях систем та інших областях. У сучасній науці велика увага приділяється вивченню способів представлення знань в системах. Для цього використовується математичний апарат логіки, теоретичної інформатики, структурної лінгвістики, теорії множин та методів штучного інтелекту.

2.4.2. Штучні та природні системи

За походженням системи поділяють на *штучні* та *природні* системи (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Види систем за походженням

Природні системи є продуктом розвитку природи та виникли без

втручання людини.

Штучні системи являють собою результат творчої діяльності людини.

2.4.3. Прості, складні та великі системи

За ступенем складності виділяють *прості*, *складні* та *великі* системи (рис. 2.6).

Простими системами називають системи, що складаються з обмеженої і відносно малої кількості елементів з однотипними однорівневими зв'язками. Такі системи з достатнім ступенем точності можуть бути описані відомими математичними співвідношеннями.

Складні системи – це системи реального світу, що складно формалізуються або не формалізуються взагалі.

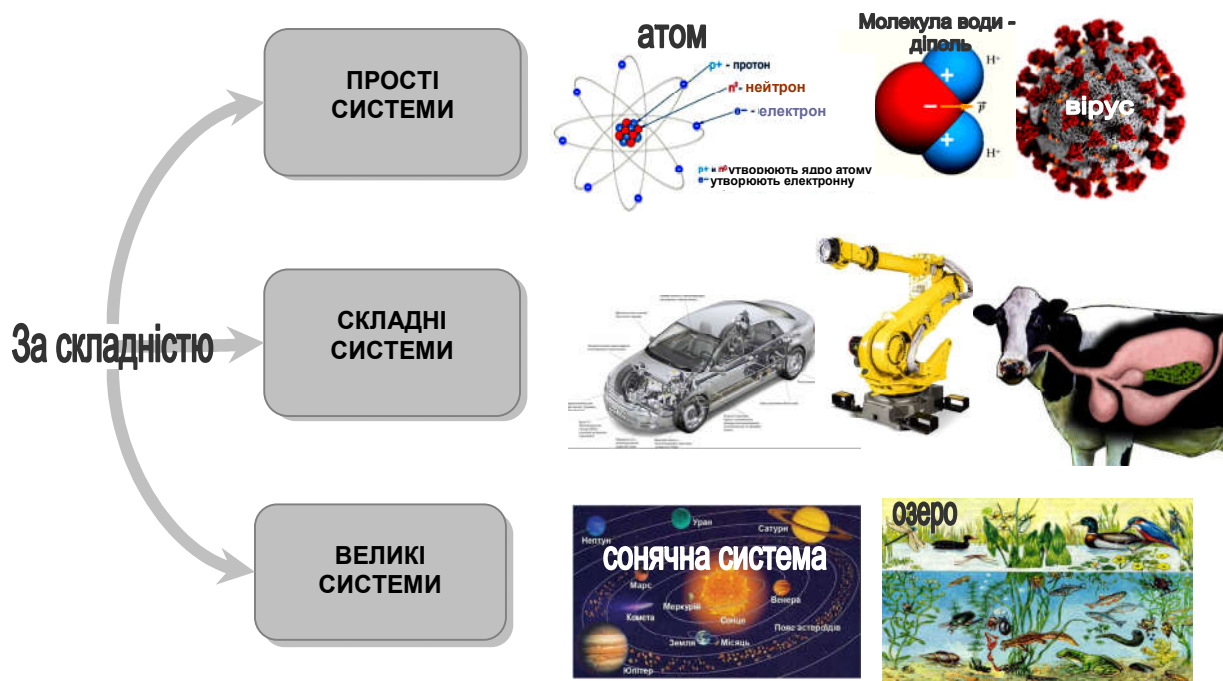


Рис. 2.6. Види систем за складністю

Складні системи мають наступні відмінні риси:

– надвелика кількість параметрів, що описують систему та наявність параметрів, що не піддаються кількісному визначенню (параметри з якісними значеннями);

– неможливість формалізації мети функціонування системи без

суттєвих припущень та спрощень, що обумовлюється її змінюваністю у часі;

– неможливість формалізованого опису системи у цілому без її декомпозиції та спрощення.

Складні системи мають велику кількість елементів, що зв'язані між собою різними типами зв'язків – структурними, функціональними, інформаційними, просторово-часовими. Це структурно та функціонально складні багатокомпонентні системи. Вони характеризуються багатомірністю та різноманітністю структури, різноманіттям природи та фізичних властивостей елементів та зв'язків між ними. Крім того, всі елементи складної системи також можуть бути подані та розглядатися як система, тобто виступати підсистемами цілісної макросистеми.

Складні системи відрізняються від простих наявністю трьох основних ознак: *робастністю* – здатністю зберігати часткову працездатність при відмові окремих елементів; *неоднорідністю зв'язків* та *емерджентністю* – виникненням і цілісністю нових властивостей при поєднанні окремих елементів у системі, що принципово не зводиться до простої суми властивостей цих елементів.

Важливою особливістю складних систем, особливо живих, технічних і соціальних, є можливість передавання інформації, що призводить до виникнення функціональних взаємозв'язків між їх елементами. До найбільш складних видів подібних систем відносяться цілеспрямовані системи, поведінка яких підпорядкована досягненню певних цілей, а також системи, що самоорганізуються та здатні в процесі функціонування видозмінювати свою структуру.

Прикладом складної системи є відома прецизійна приладова система вимірювання кутів (ППСВК) [4] структурна схема якої приведена на рис. 2.7. ППСВК – це складна система, що організована у вигляді функціональної сукупності множини різномірних технічних засобів. Основними елементами є фоточутлива КМОП-матриця, штучні нейронні мережі (ШНМ), підсистема фільтрації, що працює за методом ковзного середнього (moving average method), який є окремим випадком фільтру Калмана. Робота КМОП-матриці

ґрунтується на законах лазерної спектроскопії, властивостях фоточутливих напівпровідників. Робота ШНМ обумовлена принципами нейротехнології.

Синергетична інтеграція вказаних елементів в складі ППСВК дозволила застосувати сучасні інформаційні технології та методи обробки вимірювальної інформації, що забезпечило підвищення точності та швидкодії вимірювання кутів.

0-level ППСВК – рівень продукування вхідного вимірювального сигналу α_{in}^A . *0-level* ППСВК сформований як *прецизійна підсистема вимірювання кутів (ПВК) / subsystem of the angle high-precision measuring (SAM)*.

1-level ППСВК утворений підсистемою *узгодження і перетворення інформації / сигналу (УПІ) / Signal conditioning and conversion (SCC)*, яка попередньо обробляє цифрові сигнали α_{in}^D з *0-level* – підсилює та фільтрує сигнали. Основний складовий елемент даного рівня – блок узгодження і перетворення інформації (*information matching and transformation unit*) за функцією $\alpha_{in}^{D/D'} : (\alpha_{in}^D \rightarrow \alpha_{in}^{D'})$, де α_{in}^D – вихідний цифровий сигнал з *0-level*, $\alpha_{in}^{D'}$ – сигнал після фільтрації.

З *1-рівня / 1-level* множина вимірювальних даних у цифровій формі $\alpha_{in}^{D'}$ передається на

2-level ППСВК утворений підсистемою *обробки та відображення сигналу (ОВС) / subsystem of signal processing and displaying (SSPD)*. Основними складовими *2-level* є ШНМ автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання та ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів. Дані ШНМ реалізовані програмно.

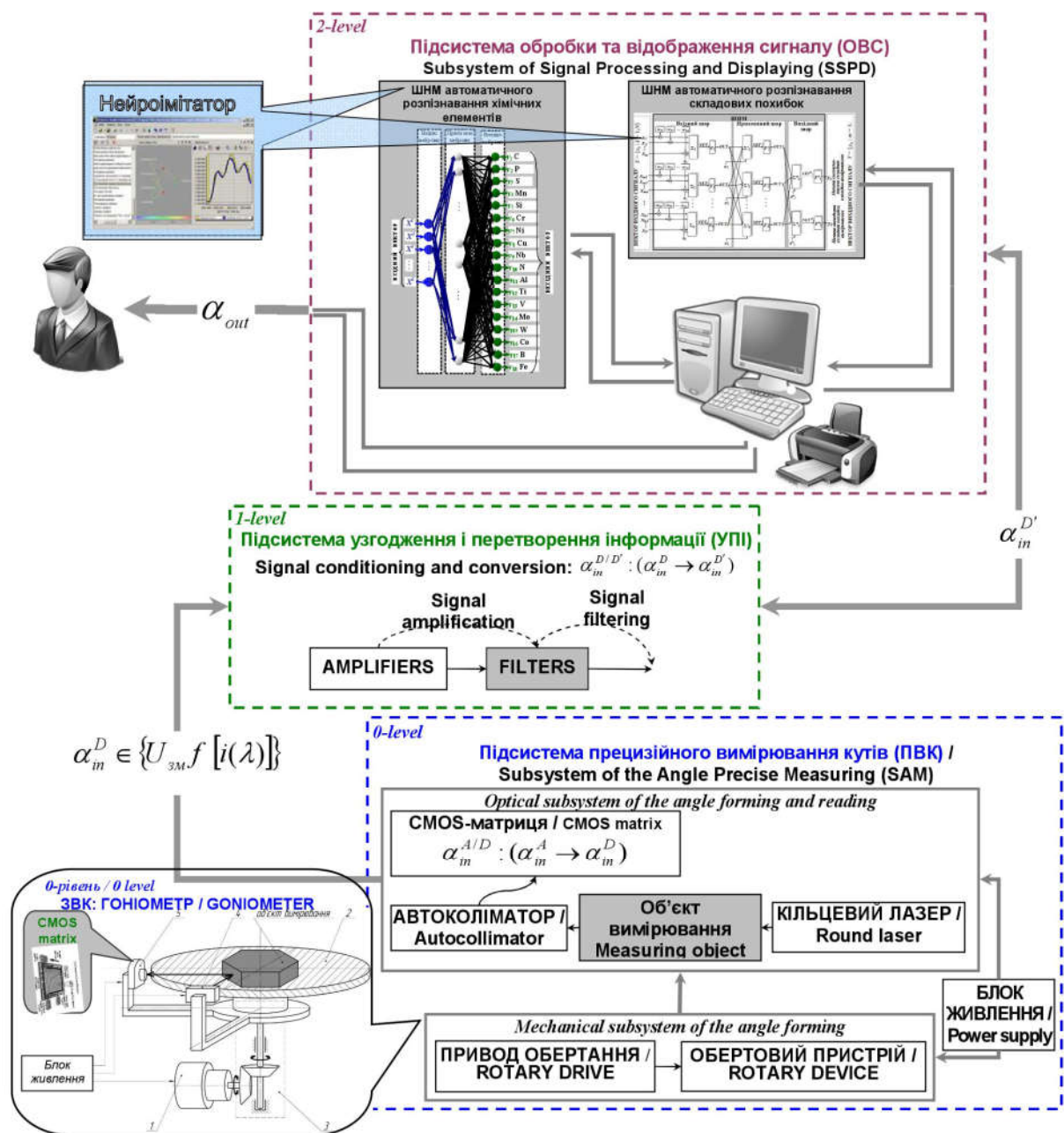


Рис. 2.7. Структурна схема відомої ППСВК із літератури [4]

Для автоматичного розпізнавання складових похибок вимірювання синтезовано ШНМ, яка автоматично виконує експрес-аналіз похибок та їх декомпозицію в режимі реального часу. Спектральний експрес-аналіз хімічних речовин у металовмісних матеріалах об'єктів вимірювання (ОВ) виконується відповідною ШНМ автоматичного розпізнавання хімічних елементів. Принцип роботи наступний. Електричний сигнал генерований КМОП-матрицею у відповідності до інтенсивності спектрального випромінювання ОВ подається на входи ШНМ, яка автоматично диференціює хімічний склад ОВ. У відповідному програмному модулі на комп'ютері, що є також елементом

підсистеми ПВС, здійснюється аналіз і обробка результатів роботи ШНМ та представлення їх у зручному для користувача виді. Зокрема автоматизовано виконується нормування складових похибок вимірювання.

У цілому відома та описана в літературі [4] ППСВК у автоматизованому режимі реалізує безконтактні прецизійні гоніометричні вимірювання та експрес-аналіз інтенсивностей спектрального випромінювання хімічних елементів металовмісних матеріалів ППСВК призначена для попередньої виставки навігаційних чутливих елементів (НЧЕ), вимірювання плоских кутів, пірамідальності призм, показника заломлення оптичного скла, визначення хімічного складу металовмісних матеріалів з обробкою вимірювальної інформації в режимі реального часу.

Великими системами називають багатокомпонентні системи, що містять велику кількість складових (елементів / підсистем), функціональна взаємодія яких забезпечується множиною різнорідних та багаторівневих зв'язків. Загалом великі системи це розподілені у просторі і часі надскладні системи, що продукуються множиною *складних систем* про які було сказано раніше. Тобто елементами великих систем є кінцева множина складних систем.

Основними ознаками великих систем та їх відмітність від складних систем є просторова та часова розподіленість, гіперрозміри, складна ієрархічність, кругообіг макро- та мікро- інформаційних, енергетичних і матеріальних та ін. потоків, високий ступінь невизначеностей при формалізації системи.

2.4.4. Статичні та динамічні системи

Важливим є поділ систем на види за змінюваністю властивостей. У відповідності до цього виділяють статичні та динамічні системи (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Види систем у відповідності до змінюваності їх властивостей

Для *статичної системи* характерним є те, що її стан з часом залишається постійним (наприклад, газ в обмеженому обсязі – в стані рівноваги).

Динамічна система змінює свій стан у часі (наприклад, живий організм).

2.4.5. Керовані та некеровані системи

За характером поведінки при дії на систему керувального впливу системи поділяють на *керовані* та *некеровані*. До керованих систем, як правило, належать штучні системи. Природні системи у своїй переважній більшості є некерованими. Прикладом некерованих систем є Сонячна система, в якій траєкторії руху планет визначаються діючими у Всесвіті законами гравітації.

Керовані системи – це системи, які мають властивість змінювати свою поведінку та переходити в різні стани під впливом різних керуючих впливів.

У керованих системах завжди присутній орган, який здійснює керування тобто керуюча частина – система керування (СК), і керована частина – об'єкт керування (ОК).

Керування – це динамічний процес, що відбувається у режимі online і направлений на забезпечення роботи системи (об'єкту, процесу, явища). Очевидно, що всі СК складають спеціальний підклас динамічних систем.

У цілому СК являє собою комплекс апаратних і програмних засобів, узгоджена взаємодія яких направлена на об'єкт керування, стан якого контролюється зворотним зв'язком. Класична схема СК зі зворотним зв'язком по стану представлена на рис. 2.9.

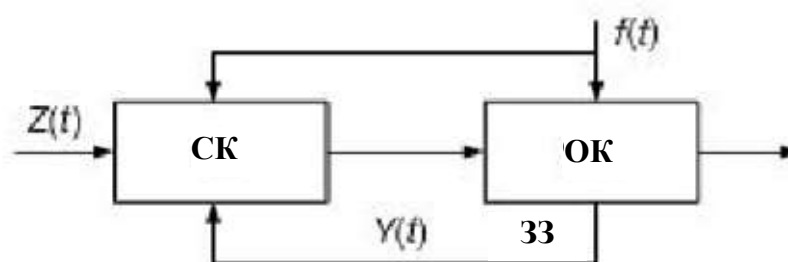


Рис. 2.9. Загальна схема керованої системи

Процес керування в системах зі зворотним зв'язком (ЗЗ) організовується відповідно до програми керування, робота якої полягає у врегулюванні відхилень поточного стану $Y(t)$ ОК від стану $Z(t)$, передбаченого на даний момент часу відповідно до програми формування закону керування в системі, з метою утримання її в заданому стані. Відхилення поточного $Y(t)$ стану системи від заданого $Z(t)$ обумовлюється впливом на систему збурюючих впливів $f(t)$, які можуть бути зовнішнього та внутрішнього характеру.

Існує велика кількість СК у відповідності до різноманітності ОК. Тому розглянемо класифікацію ознак побудови застосовуваних СК. Так, СК класифікують:

1. За рівнем автоматизації;
2. За складністю керування;
3. За ступенем невизначеності СК;
4. За принципами структури СК;
5. За кількістю рівнів підпорядкованості.

В залежності від **рівня автоматизації** керування може бути

ручним, автоматичним і автоматизованим. При ручному керуванні усі функції процесу керування виконуються людиною. У автоматичних СК участь людини повністю виключена із процесу керування. У автоматизованих СК людина частково приймає участь у керуванні, в основному при прийнятті рішень, а збирання та первинна обробка інформації здійснюється комплексом апаратних і програмних засобів.

За *складністю* СК поділяють на прості та складні.

За *ступенем невизначеності* СК розбивають на детерміновані та стохастичні (імовірнісні).

Детермінованою називають систему, у якій за її попереднім станом і деякій додатковій інформації можна чітко сформулювати (спрогнозувати) наступний стан.

Особливістю стохастичної (імовірнісної) системи є неможливість чіткого прогнозування її наступного стану на основі аналізу її попереднього стану. Для стохастичних (імовірнісних) систем характерно лише визначення множини можливих станів та ймовірності їх виникнення.

Варто вказати на умовність поділу СК на прості та складні, детерміновані та імовірнісні, що обумовлюється розвитком і удосконаленням принципів та методів дослідження систем, до дозволяє переведення СК із одного виду у інший.

Більш детально детерміновані та стохастичні системи розглядаються у п. 2.4.6. даного навчального посібника.

За *принципами структури СК* виділяють централізовані та децентралізовані структури СК. Для *централізованих структур СК* характерною є концентрація всіх процесів керування у загальному (центральному) органі керування. Для *децентралізованих структур СК* характерним є утворення для кожного елемента ОК окремого локального органу керування для, що здійснює керування цим елементом. При цьому загальне керування системою у цілому здійснюється шляхом узгодження інформації між локальними СК (рис. 2.10).

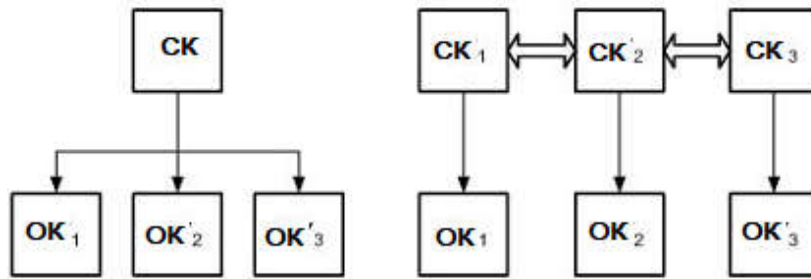


Рис. 2.10. Централізована та децентралізована системи керування

За кількістю рівнів підпорядкованості розрізняють однорівневі та багаторівневі або ієрархічні СК.

Для ієрархічних СК характерним є розподілення функцій керування між локальними СК, що підпорядковуються центральній СК. Керуючий вплив у ієрархічних СК направлений від верхніх рівнів до нижніх, а зворотній зв'язок, що відображає поточний стан ОК навпаки від нижніх рівнів до верхніх (рис. 2.11).

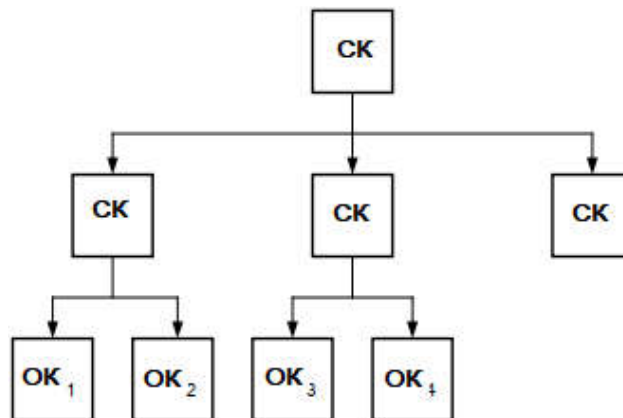


Рис. 2.11. Ієрархічна система керування

2.4.6. Детерміновані та стохастичні системи

За ступенем визначеності всі системи поділяють на *детерміновані* та *стохастичні (ймовірнісні)*.

Як вказувалось раніше *детермінованою* називають систему, у якій за її попереднім станом і додатковій інформації можна чітко визначити у якому наступному стані вона опиниться. Типовий приклад детермінованою системи – автоматична телефонна станція, що працює безперебійно та бездоганно по жорсткій, наперед заданій програмі.

Детерміновані системи завдяки тому, що їх стан може бути передбачуваний, як правило, працюють в автоматичному режимі.

Для *стохастичної (імовірнісної)* системи на основі аналізу її попереднього стану і додаткової інформації можна з певною ймовірністю прогнозувати настання одного із множини наступних станів та ймовірність виникнення кожного стану із цієї множини.

Класичним прикладом стохастичної системи може бути система керування рухом повітряного транспорту в аеропортах. Така система, що складається з множини не тільки машин, але і людей, переробляє інформацію, що надходить від багатьох джерел: радіолокаційних станцій, метеобюро, літаків, наземних служб тощо. При цьому на роботу системи впливає множина збурюючих факторів – виникнення інформаційних перешкод, що порушують радіозв'язок, погіршення погодних умов тощо. Вказане унеможлиблює точного передбачення наступного стану. Тому, як правило, стохастичні системи працюють в автоматизованому режимі.

Поведінка детермінованих та стохастичних систем описується за допомогою диференціальних рівнянь.

2.4.7. Дискретні та безперервні системи

За характером зміни вхідних (керуючих) $Z(t)$ і вихідних $Y(t)$ сигналів у часі виділяють *дискретні* та *безперервні* системи.

Дискретними вважаються системи у яких вхідні (керуючі) $Z(t)$ і вихідні $Y(t)$ сигнали змінюються лише в дискретні моменти часу $t_i, i = 1, 2, \dots, n$ (рис. 2.12). Більшість відомих систем, в тому числі найскладніші штучні системи є дискретними.

Безперервними системами називають системи в яких сигнали змінюються безперервно (рис. 2.12). Прикладом безперервної системи може бути велосипедист, що іде на велосипеді. В даному випадку такі підсистеми цієї системи як колеса велосипеда та ноги велосипедиста безперервно змінюють своє положення. Також прикладом безперервної системи може виступати секундна стрілка годинника, що рухається по циферблатному колу. Прикладом безперервної системи може виступати

Сонячна система, процес обертання Землі навколо Сонця, процес обертання Місяця навколо Землі тощо.

Виникнення дискретних сигналів в системах може бути викликано різними причинами. Одна з них – це спеціальна дискретизація сигналу, яка виконується, наприклад, для захисту сигналу від перешкод при його передачі по каналу зв'язку або для передачі декількох сигналів по одному і тому ж каналу. В цьому випадку безперервний сигнал замінюється послідовністю імпульсів, один з параметрів яких, наприклад, амплітуда чи ширина чи частота містить інформацію про дискретні значення сигналу. Такий спосіб дискретизації сигналу називається імпульсною модуляцією.

Наприклад, при керуванні мобільним роботом потрібно одночасно керувати всіма його приводами (маніпуляторами і двигунами рухомої платформи). У цьому випадку застосовують імпульсну модуляцію, що дозволяє одночасно передавати по одному інформаційному каналу всі необхідні для управління сигнали.

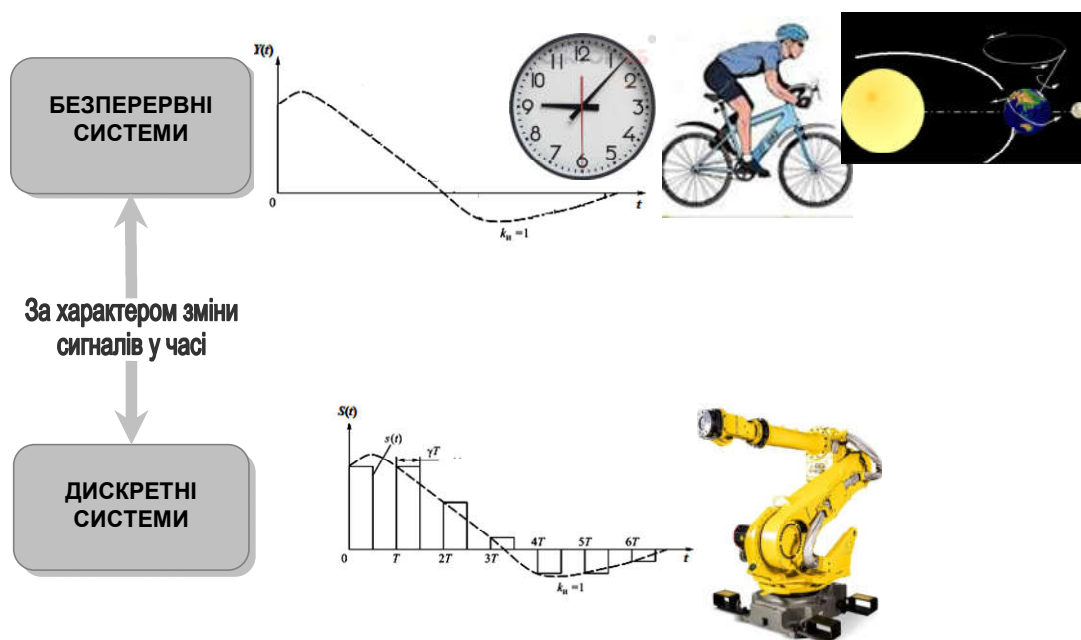


Рис. 2.12. Види систем за характером зміни сигналів у часі

Основною причиною дискретизації сигналів в сучасних технічних системах є широке використання обчислювальної техніки для обробки інформації та формування сигналів управління. Застосування

обчислювальної техніки передбачає перетворення сигналів в дискретну цифрову форму, тобто в послідовність значень, представлених у вигляді цифрового коду. Таке перетворення називають аналогово-цифровим перетворенням, а пристрій, що використовується для цього називають аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП). Іноді це перетворення умовно розглядають як послідовність двох перетворень – квантування (тобто дискретизації) за часом і квантування за рівнем. Останнє з цих перетворень відповідає за подання послідовності інформаційних сигналів в цифровому вигляді з заданим числом розрядів.

Також дискретність сигналу може бути пов'язана і з будовою датчиків інформації, що застосовуються в системі. Наприклад, при використанні цифрових датчиків положення, кута повороту або швидкості вимірюється інформація доступна тільки в дискретні моменти часу.

Загалом аналіз дискретних систем є простішим за аналіз безперервних систем, тому всі безперервні системи можна розглядати як дискретні із безкінечно великою кількістю станів.

2.4.8. Відкриті та закриті (замкнуті) системи

Важливим в системному аналізі є поділ систем у відповідності до їх взаємодії із оточуючим середовищем на *відкриті* та *закриті* системи.

Поняття *відкритості* систем конкретизується для певної предметної галузі. Наприклад, в галузі інформаційних систем відкритими називаються програмно-апаратні комплекси, яким притаманні такі властивості:

- мобільність (можливість перенесення програмного комплексу на різні апаратні платформи і в різні операційні системи);
- стандартність (відповідність програмного комплексу будь-якого розробника певному стандарту);
- гнучкість (можливість встановлення нових програмних і апаратних засобів незалежно від конкретного розробника);
- сумісність (можливість взаємодії програмного комплексу із іншими комплексами на основі розвинених інтерфейсів з додатками в інших операційних системах).

На відміну від відкритих *замкнуті* системи ізольовані від середовища, тобто у них відсутні вільні входи. Наприклад, мережі для обробки конфіденційної інформації.

2.5. Методи системного аналізу та принципи системного підходу

2.5.1. Характеристика принципів системного підходу

Як вказувалось раніше універсальним методом вивчення та дослідження складних систем різної фізичної природи є системологія в її окремому випадку та системний підхід у цілому. При побудові складних систем під **системологією** в даному випадку слід розуміти науку про системні взаємозв'язки принципів та базових категорій процесу проектування (розробки) систем, а також систем представлення якісних та кількісних характеристик їх властивостей, що враховуються при побудові та / або отриманні при їх (систем) функціонуванні [12]. Необхідно відмітити, що дане визначення не суперечить загальноприйнятому розумінню терміну **системологія** [14].

При дотриманні системного підходу будь яка система розглядається як єдине структурно-функціональне ціле, що складається з частин і елементів з цілісним характером виконуваних функцій [12].

Відповідно до викладеного процес побудови будь якої системи формально можна представити у вигляді деякої функції прийняття рішень φ , що враховує множину принципів $(P_{i_p} | i_p = \overline{1, n_p})$, де n_p – деяка кількість принципів із певної їх множини, що характеризує системність $(S_{i_s} | i_s = \overline{1, n_s})$, де n_s – кількість компонентів, що характеризують системність, декартовий добуток (\times) яких призводить до забезпечення системи певних обмежень і розширюють функціональні можливості системи [12].

Відомо [16], що між складовими у будь-якій системі встановлюються певні відносини між її компонентами, що володіють певними властивостями. Ці властивості і відносини, що характеризують взаємозв'язок, впорядкованість і взаємодію даних складових, є конкретним

проявом **головного принципу системного підходу як компонента системології – цілісності системи**. За цим принципом системний підхід розглядає як матеріальні об'єкти, так і відображення процесів мислення у взаємозв'язку, єдності і динамічній взаємодії. Крім зазначеного принципу при системному підході застосовують і інші, апіорі необхідні, принципи [12].

Принцип модульності – один з прогресивних принципів побудови (проектування) різних технічних систем. Принцип модульності передбачає поділ процесу побудови / проектування системи будь-якого функціонального призначення на окремі складові, що дозволяє частково зменшити складність цього процесу і деталізувати його при розробці складових системи. При побудові систем за принципом модульності з дотриманням концепції уніфікації, що полягає в застосуванні в складі системи уніфікованих вузлів і елементів, які серійно випускаються промисловістю, досягається взаємозамінність і уніфікація, що є передумовою до збільшення часу експлуатації, спрощення модернізації і т.п. [4, 12].

Очікувані результати застосування принципу модульності наступні:

1) скорочення часу проектування завдяки застосуванню складових елементів, що випускаються промисловістю [4, 12];

2) покращення характеристик системи, наприклад, підвищення надійності роботи завдяки застосуванню складових елементів, які позитивно зарекомендували себе на відповідність таким показникам надійності як інтенсивність відмов, напрацювання на відмову, імовірність безвідмовної роботи і т.п. [4, 12];

3) зменшення витрат на виробництво, підвищення ремонтпридатності і експлуатаційних характеристик тощо [4, 12].

Принцип інваріантності (гнучкості) успішно застосовується при побудові різних систем. Цей принцип проявляється таким чином, що певною мірою відтворює універсальність системи. Принцип інваріантності вказує на властивість системи щодо незмінності призначення і здатності функціонувати при зміні її структури або елементів. Принцип

інваріантності передбачає універсальність і типовість елементів системи, що функціонують незалежно один від одного, забезпечуючи можливість виконання певних різних функцій кожної підсистеми в межах її призначення. При цьому форми інформаційних потоків повинні бути узгоджені таким чином, щоб забезпечити функціональну взаємодію всіх елементів системи і збереження її структури відкритою з метою подальшого вдосконалення і доопрацювання в разі виникнення такої необхідності [4, 12].

Очікуваними результатами при дотриманні принципу інваріантності (гнучкості) побудови систем є розширення функціональних можливостей і поліпшення характеристик, наприклад, за рахунок використання сучасної елементної бази. У загальному випадку особливу користь принцип гнучкості набуває при експлуатації і модернізації технічних систем [4, 12].

Принцип автоматизації розглядається виходячи з визначення автоматизації як такої, коли використовуються спеціальні технічні засоби і математичні методи з метою звільнення людини від участі в процесах отримання, перетворення, передачі і використання інформації, енергії, матеріалів і т.п., або суттєвого зменшення його участі в цих процесах [4, 12].

За рахунок використання можливостей автоматизації забезпечується оперативна обробка вимірювальної інформації. Людина звільняється від виконання багатоетапних, рутинних і трудомістких процесів обробки інформації, наприклад, при визначенні складових похибок вимірювання, обчисленні величини вимірюваного кута, оцінці величини випадкової складової похибки вимірювання за результатами багаторазових спостережень і т.д. [4, 12].

Наприклад, принцип автоматизації, успішно застосований при побудові відомої прецизійної приладової системи вимірювання кутів (ППСВК) з метою підвищення рівня автоматизації власне ППСВК при її функціонуванні. За рахунок використання нових нейромережевих методів обробки інформації, а також нових розробок в галузі спектроскопії, електроніки і оптики, зокрема фоточутливих матриць, людина звільнена

від процесів отримання і обробки вимірювальної інформації. Відповідно, зменшується вплив оператора, і як результат – зменшується величина суб'єктивної похибки, яку він вносить при вимірах. Очевидно, що точність вимірювань в такому випадку збільшується. Крім того, застосування принципів автоматизації забезпечує підвищення швидкодії вимірювань. В даному випадку очікуваними результатами від застосування принципів автоматизації є зменшення суб'єктивної похибки, підвищення точності і швидкодії вимірювання кутів [4, 12].

Принцип ієрархічності базується на понятті ієрархія, під яким розуміється упорядкована система абстракцій, наприклад, структурних модулів, підмодулів і т.д. [15]. Застосування принципу ієрархічності спрощує розуміння складних завдань за рахунок розбиття її на більш прості, або утворення простих структур, які порівняно легко дослідити [4, 12].

Відомо, що будь-яка система має множину зв'язків і відносин з різними системними і несистемними утвореннями середовища, в якій вона функціонує. Утворення, з якими взаємодіє система, складають середовище системи. Під середовищем системи необхідно розуміти об'єкти, явища, процеси навколишнього середовища, що мають необхідний і суттєвий вплив на функціонування і розвиток системи [4, 12].

За принципом ієрархічності функціонування системи здійснюється в цілому без її розчленування на складові, тобто у формі цілого і структурованого з відображенням внутрішніх процесів і зв'язків [4, 12].

Принцип агрегування передбачає об'єднання попередньо розділених частин системи на окремі складові. При цьому враховуються параметри і характеристики інформаційних, енергетичних і матеріальних потоків. Це дозволяє частково зменшити складність системи і покращити детальне опрацювання складових системи. Крім того, агрегування дозволяє забезпечувати гнучкість системи, яка відображається у можливості перебудови або переналагодженні системи в залежності від динамічних вимог навколишнього середовища чи умов праці.

Застосування принципу агрегування при побудові складних систем

передбачає врахування наступних аспектів:

1) складна система розглядається як цілісний об'єкт, якому властива множина різних показників, наприклад, метрологічних, технічних тощо;

2) складові системи розглядаються як окремі (автономні) елементи, що володіють взаємозамінністю і функціональною сумісністю (наприклад, конструктивною, інформаційною тощо).

Принцип структурованості [15] означає, що складна система як об'єкт проектування складається з певних структурних елементів, які в певній методологічній послідовності активно використовуються в процесі побудови / проектування з прийняттям відповідних кінцевих рішень.

Принцип системності може бути інтерпретований до побудови складної системи як прояв системного підходу щодо дій (аналіз, синтез, проектування) будь-якого процесу і явища: програмування, технологічної діагностики, аналізу, синтезу, побудови / проектування технічних систем, технологій використання систем та систем керування ними [4, 12, 15, 16].

В цілому, принцип системності полягає в тому, що складна система розглядається як організована сукупність елементів, функціонально взаємодіючих між собою. Причому, функціональна взаємодія між елементами системи базується на принципах абстрагування, структурованості, ієрархічності і ін. [4, 12].

Основна увага при побудові складної системи за принципом системності приділяється формуванню її структури в цілому як елементів системи і складових окремо, характерних зв'язків (відносин) між ними, використання властивостей, наприклад, масо-габаритних, інформаційних, матеріальних і енергетичних параметрів і характеристик цих елементів, що виявляються при функціональних взаємодіях і взаємозв'язках [4, 12].

Принцип цілісності дозволяє розглядати складну систему в єдності її взаємодіючих складових. Причому властивості окремих складових системи не можуть бути об'єднані простим підсумовуванням для формування властивостей системи в цілому. Цілісність системи проявляється за рахунок міцних внутрішніх функціональних зв'язків між складовими і є основою для проявів принципу самостійності

(автономності, незалежності) при функціонуванні системи [4, 12].

Принцип емерджентності можна інтерпретувати як виникнення нового цілого (другий принцип кібернетики по Р. Ешбі) [15], походить від англ. *emergent* – той, що з'являється, несподівано виникає.

Джерелом емерджентних властивостей виступає структура системи, так як при різних структурах системи, утворених з одних і тих же елементів, у неї виникають різні властивості. У цьому сенсі принцип емерджентності підкреслює можливість розбіжності окремих локальних процесів, функцій, властивостей з глобальною функцією роботи системи [4, 12].

Принцип емерджентності є наслідком принципу цілісності. З цих позицій система виступає як ціле в тому сенсі, що є носієм емерджентності. Зокрема основні функції системи виявляться лише в разі функціональної взаємодії всіх її елементів разом, що реалізується в певній послідовності. Тобто, жодна з частин системи самостійно не забезпечує виконання певної глобальної функції (макрофункції)

Принцип емерджентності, як більш розвинена форма закону діалектики про перехід кількості в якість, проявляється виникненням у системи нових властивостей при введенні в її структуру нових елементів [4, 12, 15].

Принцип декомпозиції і композиції є розвитком принципів модульності, структурованості, системності та цілісності. Принцип декомпозиції, який використовується при побудові складних систем, відомий в багатьох галузях сучасних виробництв, наприклад, в автоматизованому машинобудуванні. Зокрема при автоматизованому виборі технологічного обладнання (наприклад, пристроїв орієнтування) при проектуванні гнучких виробничих систем він проявляється в попередньому розбитті по виконуваних функціях з подальшим угрупованням і функціональним узгодженням як пристроїв орієнтування, так і об'єктів виробництва, що описано в роботі [5].

Наприклад, при побудові складної системи проявом принципу декомпозиції і композиції є можливість розділяти і / або об'єднувати за

функціональним призначенням окремі складові з відповідними функціями, наприклад, сприйняття первинного аналогового сигналу, перетворення сигналу в цифрову форму, фільтрації сигналу, виділення окремої корисної складової і похибки, зменшення величини похибки, представлення результатів користувачеві в зручній формі тощо [4, 12].

Принцип результативності полягає в прагненні до отримання при побудові складної системи кінцевого результату. Особливість постановки завдань наукової проблеми побудови складної системи дозволяє стверджувати, що завжди існує функція, яка відображає процес перетворення вхідних інформаційних і енергетичних потоків (сигналів) у відповідну вихідні потоки (сигнали). Кількісна складова цієї функції повинна вказувати на ступінь досягнення результату [12].

$$\varphi: [(P_{i_p} | i = \overline{1, n_p}) \times (S_{i_s} | i = \overline{1, n_s})] \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (\Phi(\Delta) \leq \Phi[\Delta]) \leftrightarrow (\Phi(\Delta) \rightarrow \min) \\ (\Phi(\tau) > \Phi[\tau]) \leftrightarrow (\Phi(\tau) \rightarrow \min) \\ (\Phi(\xi) > \Phi[\xi]) \leftrightarrow (\Phi(\xi) \rightarrow \max) \end{array} \right\}$$

де $\Phi(\Delta)$ – абстрактний функціонал проектованої системи, що, наприклад, корелює з величиною похибки Δ : $(\Delta) \leq 0,12''$, де $0,12''$ – похибки вимірювань сучасних гоніометричних систем кращих світових зразків [12];

$\Phi(\tau)$ – абстрактний функціонал проектованої системи, що, наприклад, для складної вимірювальної системи корелює з часом вимірювання τ , яке в тому числі включає в себе час отримання і обробки вимірювальної інформації: $(\Phi(\tau)) = (\tau \cong \tau_{rt})$, де τ_{rt} – режим реального часу, при якому отримання і обробка інформації здійснюється зі швидкістю розвитку подій [12];

$\Phi(\xi)$ – абстрактний функціонал, що корелює з множиною $(\xi_{ni} | i = \overline{1, I})$ функціональних можливостей ξ : $(\Phi(\xi)) = (\xi_i | i = \overline{1, I})$, де i – найменування функціональних можливостей загальною кількістю I , наприклад, "вимір плоских кутів", "вимір спектральної

випромінювальної здатності" і т.д. [12];

↔, → – відповідно символи рівноцінності висловлювань і логічного слідування.

У даному виразі в квадратних дужках [...] вказані відповідні параметри базової системи, а у круглих дужках (...) – відповідні параметри розроблюваної системи.

В іншому випадку з урахуванням принципів декомпозиції і композиції, системності, модульності, інваріантності (гнучкості), автоматизації, ієрархічності і агрегування здійснюється коригування або зміна початкових, проміжних та інших даних і виконується ітераційний і / або рекурсивний повтор розрахунків. Таким чином, принцип результативності повинен виконуватися цілеспрямовано до досягнення бажаного результату [12].

Принцип синергетичної інтеграції як один з основних принципів мехатроніки є інтегруючим принципом, що системно об'єднує всі інші вище наведені принципи системного підходу. Змістовно він може трактуватися як більш розвинена форма емерджентності. Дотримання принципу синергетичної інтеграції при побудові складної системи дозволяє отримати більший ефект від взаємодії функцій складових (елементів) системи, ніж при індивідуальному (окремому) функціонуванні цих складових. Дотримання принципів синергетичної інтеграції при побудові складної системи передбачає сприйняття складових системи як синергетично (функціонально) взаємодіючих частин, які утворюють ціле, і отримати принципово нову властивість системи [12].

Таким чином, ефективність функціонування складної системи залежить від множини внутрішніх і зовнішніх факторів, пов'язаних як з елементами системи, так і їх взаємодією. Відповідно до принципу емерджентності сукупна взаємодія декількох факторів, як правило, завжди відрізняється від суми відокремлених ефектів. Кількісною оцінкою емерджентності є отриманий ефект від синергетичної інтеграції. Основний закон синергії полягає в тому, що ефективність функціонування будь-якої складної системи обумовлюється її цілісністю. Тому максимальний ефект

від функціонування системи можна отримати шляхом сукупного використання складових, що характеризують поняття системології [12].

Іншими словами джерелом емерджентних властивостей виступає структура системи. Так при різних структурах системи, утворених з одних і тих же елементів, виникають різні властивості. З даної позиції принцип емерджентності підкреслює можливість неспівпадіння окремих локальних процесів, функцій, властивостей з глобальною функцією системи [4]. При цьому основні функції системи проявлятимуться тільки у випадку функціональної взаємодії всіх її елементів разом у певній послідовності. Тобто, жодна із частин системи самостійно не забезпечує виконання глобальної функції (макрофункції) [4].

2.5.2. Евристичні методи системного аналізу

Евристичні методи системного аналізу базуються на використанні знань фахівців (експертів), їх досвіду та інтуїції і використовуються для прийняття обґрунтованих рішень на кожному етапі вирішення проблеми в умовах новизни та надзвичайної складності, недостатності або збитковості інформації, неможливості або складності формалізації об'єкту (процесу, предмету, явища), який характеризується множиною різних за змістом, кількістю та якістю технічних і економічних показників, що мають різний вплив на якість рішень. В таких умовах дослідник повинен бути орієнтований на поступове формування моделі об'єкту (процесу, предмету, явища) з обґрунтуванням її адекватності на кожному етапі. Наприклад, при створенні технічних систем необхідно обґрунтовано здійснювати формулювання цілей, вибір критеріїв, методів моделювання, елементної бази тощо. Наприклад, при прийнятті рішень необхідно обґрунтовувати вибір кращого рішення із множини альтернатив і т.д.

Евристичні методи системного аналізу ґрунтуються на виявленні та узагальненні думок досвідчених фахівців – **експертів**, використанні їхнього досвіду і нетрадиційних підходів до вирішення проблеми та розв'язуваної задачі.



Експерти – це висококваліфіковані спеціалісти певної предметної галузі які володіють на високому професійному рівні знаннями та вміннями із даної галузі та здатні висловити аргументовану думку з досліджуваного явища [35, 47].

Евристичні методи системного аналізу орієнтовані на отримання **експертних оцінок** (ЕО) у кількісній та якісній формі шляхом проведення **експертного опитування**. Експертне опитування є широко поширеним та ефективним методом системного аналізу при вирішенні проблем з високим ступенем невизначеності. При цьому застосовують різні процедури (методи) отримання ЕО: дискусія, анкетування, інтерв'ювання, мозковий штурм, нарада, ділова гра тощо. Також є практика комплексного застосування вказаних процедур отримання ЕО.

Метод Дельфи – це один із найпоширеніших та популярних методів системного аналізу, що застосовується при прийнятті рішень і полягає у проведенні групового анкетування із застосуванням певного набору процедур, які виконуються в певній послідовності з метою формування групової думки про проблему, яка характеризується недостатністю інформації для використання інших методів. Для методу Дельфи характерною є **анонімність**, наявність **регульованого зворотного зв'язку** і формування **групової оцінки**. Реалізація **зворотного зв'язку** здійснюється багатоетапним опитуванням експертів із обробкою розголошенням отриманих на кожному етапі результатів. При чому на кожному з етапів опитування передбачається аргументація експертами власних рішень. Це створює умови для корегування та зміни думок експертів, завдяки чому на кожному етапі експерти набувають більшої впевненості у прийнятті того чи іншого рішення, а їх думки мають більш стійкий характер і перестають змінюватися. Зупинка процесу зміни рішень експертів є підставою завершення процедури опитування. Практика

показує, що, як правило, достатньо проведення чотирьох етапів опитування [47].

Метод сценаріїв є також одним з популярних методів прийняття рішень і використовується при необхідності експертного прогнозування. Наприклад, при визначенні доцільності впровадження нової технології у виробництво застосовують метод сценаріїв для експертного прогнозування можливого ефекту, прибутку, витрат тощо. Метод сценаріїв являє собою процедуру розчленування задачі на окремі складові із визначенням варіантів (сценаріїв) розвитку подій. Для кожного сценарію визначається прогнозна ймовірність його настання [47].

Мозковий штурм популярний метод прийняття рішень, що організовується та проводиться у два етапи. На першому етапі проводяться зборів експертів з розкриттям ними власних думок та міркувань щодо вирішуваної проблеми та рішення. При цьому на виступи експертів накладають обмеження у вигляді заборони критики щодо пропозицій інших експертів. На другому етапі аналізуються раніше озвучені експертами думки та міркування і тільки 2 – 3% з них мають благотворний результат, інші потребують подальшого доопрацювання [47].

У цілому якість, достовірність та точність ЕО при будь якому методі їх отримання залежить від підготовки власне процесу експертизи та методів обробки ЕО. Процес отримання ЕО є багатетапним та вимагає дотримання наступної послідовності дій (рис. 2.13) [47].

I етап визначення мети експертизи;

II етап створення експертної групи;

III етап розробка методології отримання ЕО та бланків опитувальників (анкет);

IV етап отримання ЕО;

V етап опрацювання ЕО;

VI етап встановлення ступеню досягнення мети експертизи.

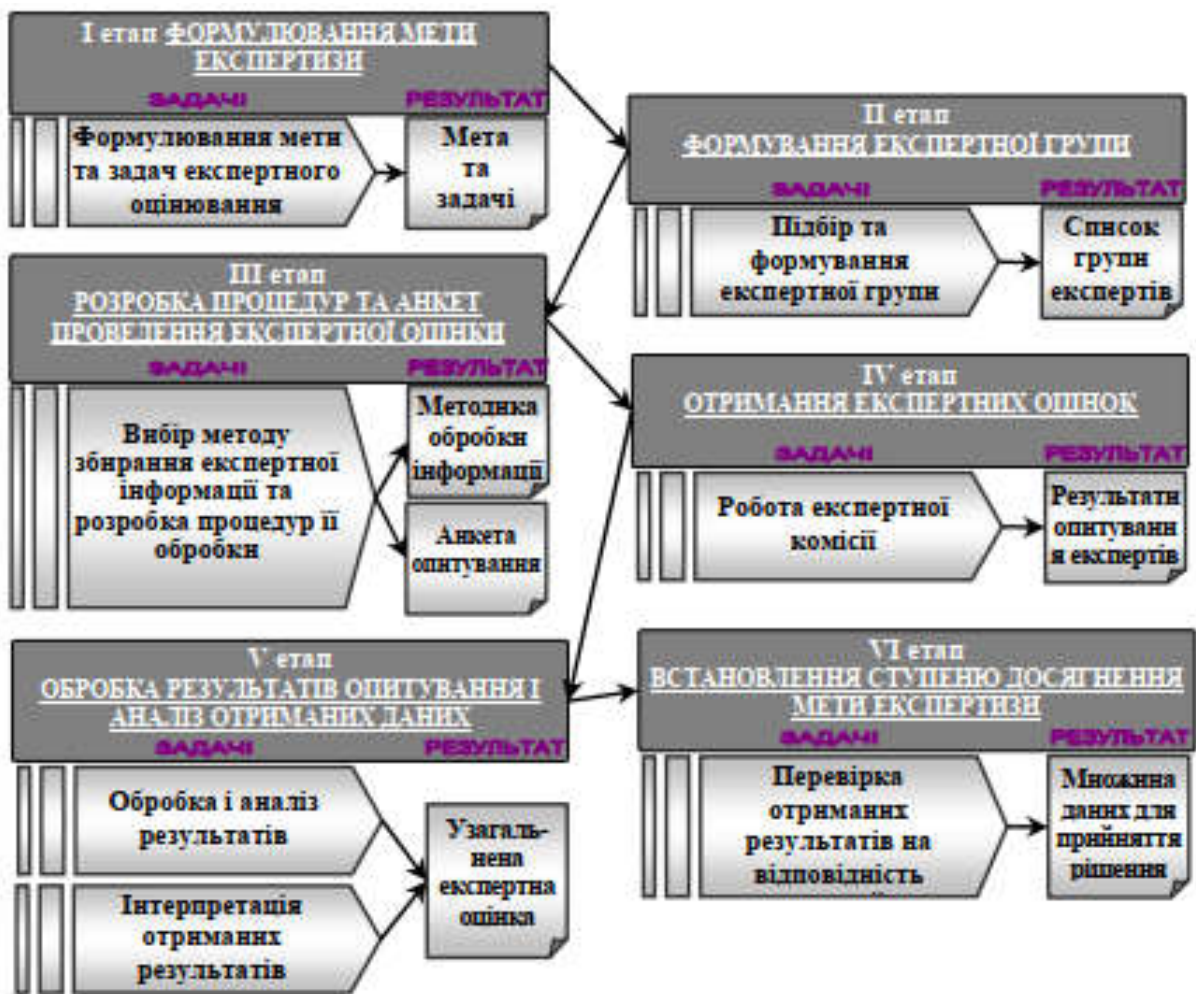


Рис. 2.13. Технологія проведення експертного оцінювання [47]

Далі наводиться детальна інформація щодо II етапу (формування експертної групи), IV етапу (отримання ЕО), обробки результатів опитування і аналізу отриманих даних та визначення ступеню досягнення мети експертизи (V та VI етап).

Важливість II етапу формування експертної групи полягає в тому, що адекватність ЕО корелює з рівнем кваліфікації опитуваних осіб, тому до участі в ньому запрошують висококваліфікованих фахівців у даній предметній галузі. Саме участь в експертному опитуванні фахівців-експертів є його принциповою відмінністю від масового опитування.

IV етап отримання ЕО. ЕО залежить від адекватності судження (думки) експертів, на яку в свою чергу має суттєвий вплив організація діяльності експертної групи та алгоритм обговорення вирішуваної

проблеми, адже, як правило, експертне опитування проводиться для оцінки складних об'єктів (процесів, предметів, явищ), що не піддаються кількісному вимірюванню та мають значний ступінь невизначеності. При цьому необхідно враховувати, що експерти можуть мати різну ступінь володіння інформацією про досліджуваний складний об'єкт, і це може призвести до виникнення суттєвої різниці в їх судженнях. При чому такі відмінні судження не обов'язково є помилковим. Тому необхідність ретельного аналізу відповідей експертів при формуванні узагальненої ЕО є очевидним.

ЕО отримують шляхом або індивідуального опитування або групового опитування.

Особливість групового опитування, наприклад мозковий штурм, полягає в тому, що експерти можуть обмінюватися думками, корегувати свої висновки та рішення і уточнювати результати. Проте суттєвим недоліком такого методу є вплив на формування спільного рішення суб'єктивної думки експерта або експертів, що мають більший авторитет. Тому групове опитування є корисним тільки при розробці нових ідей, концепцій, проектів.

Індивідуальне опитування, наприклад, за методом Дельфі, дає хороші результати. Адже експерт обмірковує відповіді без зовнішнього впливу більш авторитетного експерта. У нього є можливість провести глибокий і всебічний аналіз досліджуваного об'єкту (процесу, предмету, явища), ретельно обміркувати свої рішення. Тому індивідуальне опитування передбачає залучення висококваліфікованих фахівців, у зв'язку з чим до експертної групи висуваються досить високі вимоги та проводиться ретельний відбір експертів. Індивідуальне опитування може проводитись методом інтерв'ювання, анкетування, також експерти можуть представляти результати у вигляді доповідної записки.

Необхідно враховувати, що ефективність експертного опитування зростає при використанні формальних методів обробки отриманих результатів, які дозволяють зменшити ступінь суб'єктивності ЕО. Для цього інформація одержувана від експертів має бути представлена у

кількісній а не якісній формі. Вказане необхідно враховувати при розробці анкет та опитувальників для експертів при індивідуальному опитуванні.

Для представлення інформації якісного характеру у кількісній формі ЕО можуть формуватись **методами шкалювання**.

Тобто експерти виставляють оцінки у балах за відповідною шкалою.



Шкала – це знаряддя (прийнята система правил) для оцінювання певних об'єктів, процесів, явищ [47].

Традиційно прийнято використовувати номінальні, порядкові, інтервальна шкали та шкалу співвідношення.

Номінальна шкала є найпростішою шкалою вимірювання. При застосуванні номінальної шкали здійснюється еталонне порівняння оцінюваної властивості об'єкта, процесу, явища. У результаті отримується впорядкована множина об'єктів, процесів, явищ з присвоєнням їх відповідних балів, що приймає тільки одне із значень або нуль або одиниця. Наприклад, за номінальною шкалою здійснюється оцінювання здобувачів освіти на заліку. У якості експерту виступає викладач, який оцінює рівень знань студентів за двобальною шкалою: 1 – студент отримує залік, 0 – студент не отримує залік [47].

Порядкова шкала використовується при виявленні неявної упорядкованості властивої деякій множині об'єктів, процесів, явищ. У результаті застосування порядкової шкали отримуються порівняльні оцінки об'єкту, процесу, явища, рішення, що є кращими чи гіршими відносно деякого об'єкту, процесу, явища, рішення, що прийнято у якості оцінюючого критерію. Прикладом застосування порядкової шкали є визначення судьями переможців змагань (конкурсів). У даному випадку експерти визначають, що учасник, який здобув перше місце є кращим за учасника, що здобув друге місце, учасник, що здобув друге місце є кращим за учасника, що здобув третє місце і т.д. [47].

Інтервальна шкала – це інструмент виявлення не лише кращого об'єкту, процесу, явища, рішення а й оцінка величини цього значення

тобто оцінка на скільки один об'єкт, процес, рішення, явище є кращим за інший [47].

Наприклад, за чотирибальною ("незадовільно", "задовільно", "добре", "відмінно") інтервальною шкалою здійснюється оцінка здобувачів на екзамені. У даному випадку оцінка рівня знань студентів дозволяє виявити не просто кращих, а ще й визначити на скільки студенти є кращими порівняно один до одного. Також оцінка за інтервальною шкалою здійснюється у таких видах спорту, як фігурне катання, стрибки у воду, художня та спортивна гімнастика тощо [47].

Шкала відношення використовується для тих показників, які мають кількісне (числове) представлення. Наприклад, шкала відношення використовується при оцінці експертами можливої величини прибутку від впровадження деякого проекту, технології, рішення [47].

V етап – опрацювання ЕО. Беручи до уваги суб'єктивний характер міркувань експертів, для отримання узагальненої ЕО проводиться опрацювання множини ОЕ методами математичної статистики, визначається ступінь узгодженості думок та рішень експертів, виявляються суттєво відмітні від загального рішення.

Одним із статистичних методів експертної оцінки є **кількісна оцінка** показників. Кількісну оцінку визначають за певною шкалою. Найчастіше використовується інтервальна або порядкова шкала. У випадках, коли однакові об'єкти були оцінені різними групами експертів за різною шкалою для порівняння отриманих результатів необхідно визначити нормовані значення оцінок за визначеними сумарними оцінками розглядуваних об'єктів. Середнє значення дає можливість порівнювати між собою результати кількісної оцінки, отримані різними групами із різною кількістю експертів.



Приклад

Три експерти ($j = \overline{1, J} = \overline{1, 3}$) за десятибальною шкалою оцінили 5 зразків матеріалів ($i = \overline{1, I} = \overline{1, 5}$). Для кожного i -го зразка матеріалу за отриманими оцінками x_{ij} можна визначити його сумарне S_i , середнє \overline{X}_i та нормоване значення N_i отриманих оцінок за наступними виразами (табл. 2.1):

$$S_i = \sum_{j=1}^J x_{ij} ; \quad (2.1)$$

$$\overline{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{J} = \frac{S_i}{J} ; \quad (2.2)$$

$$N_i = \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{\sum_{i=1}^I S_i} = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^I S_i} . \quad (2.3)$$

Таблиця 2.1

Приклад кількісної оцінки та розрахованих сумарного, середнього та нормованого значення оцінки зразків матеріалів за результатами експертного опитування

Експерт $j = \overline{1, J} = \overline{1, 3}$	Оцінка x_{ij} зразку матеріалів $i = \overline{1, I} = \overline{1, 5}$				
	1	2	3	4	5
1	7	8	4	3	5
2	6	10	5	4	5
3	9	7	6	6	5
Сумарне S_i	22	25	15	13	15
Середнє \overline{X}_i	7,333	8,333	5,000	4,333	5,000
Нормоване значення N_i	0,244	0,278	0,167	0,144	0,167

Слід відзначити, що середнє значення i -го зразка матеріалу дає можливість порівнювати отримані результати експертного опитування між групами, що складаються з різної кількості експертів. А нормоване значення i -го зразка матеріалу дає можливість порівняти результати, отримані від груп експертів, що виконували оцінку за різними шкалами.

При оцінці об'єктів за інтервальною або порядковою шкалою найчастіше використовуються ранжування, парне порівняння, безпосередня оцінка [47].

Ранжування – це ранкінг об'єктів за збільшенням або зменшенням значення деякого параметру. Ранжування дозволяє обирати найбільш значущий параметр з досліджуваної множини параметрів. У підсумку отримується **ранжований ряд**. Так, якщо існує деяка множина рішень, об'єктів, процесів, явищ тощо, то у результаті їх ранкінгу деяким експертом кожен елемент множини отримує оцінку яку називають **ранг**, що приписується i -му об'єкту j -им експертом. Перевагою методу ранжування є його нескладність та порівняна елементарність, а недоліком – складність застосування для великої кількості об'єктів [47].

Парне порівняння – це встановлення переваги об'єктів при утворенні всіх можливих пар і їх взаємному порівнянні. У даному випадку на відміну від ранжування не потребується впорядкування об'єктів. Найкращий об'єкт визначається у кожній парі або встановлюється їх рівність та відповідність один одному. Парне порівняння проводять для великої кількості об'єктів та при незначній відмітності об'єктів між собою. При застосуванні методу парного порівняння утворюється матриця розмірністю $n \times n$, де n – кількість об'єктів, для яких виконується порівняння (рис. 2.1) [47].

Заповнення матриці елементами a_{ij} здійснюється за наступною схемою [47]:

$$a_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{якщо об'єкт } i \text{ є кращим за об'єкт } j \text{ } (i > j); \\ 1, & \text{якщо об'єкти рівні } (i = j); \\ 0, & \text{якщо об'єкт } j \text{ є кращим, ніж об'єкт } i \text{ } (i < j). \end{cases}$$

Об'єкти	1	2	...	j	...	n	Σ
1							
2							
...							
i							
...							
n							

Рис. 2.1. Загальний вигляд матриці парних порівнянь [47]

Сума $\sum_{j=1}^n a_{ij}$ за i -им рядком елементів a_{ij} матриці є оцінкою для визначення кращих об'єктів. Об'єкт з більшим значення суми $\sum_{j=1}^n a_{ij}$ визнається порівняно кращим. Підсумовування проводять не тільки за рядками а й за стовпчиками (тобто $\sum_{j=1}^n a_{ji}$), тоді найкращим визнається об'єкт з найменшою кількістю балів [47].

Безпосередня оцінка. Використовується не тільки для визначення найкращого об'єкту, процесу, явища, рішення але й для кількісної порівняння об'єктів, процесів, явищ, рішень між собою. Для цього у загальному інтервалі (макроінтервалі) показників об'єкта, процесу, явища виділяються мікроінтервали, які оцінюються певною кількістю балів, наприклад, від 0 до 10. Саме тому метод безпосередньої оцінки інколи іменують також *бальним методом* [47].

За даним методом експерт розташовує кожен із об'єктів аналізованої множини у певному мікроінтервалі, який оцінений певною кількістю балів у відповідності до ступеню відповідності аналізованого об'єкту до ступеня його важливості, або ступеню відповідності характеристики об'єкту певному значенню. Кількість мікроінтервалів у макроінтервалі є довільною [47].

Всі ЕО є підґрунтям узагальненої оцінки (характеристики) досліджуваного об'єкту, на підставі якої генерується рішення у відповідності до мети експертизи. Для обробки ЕО використовують

множину різних кількісних та якісних методів, але у переважній більшості випадків – статистичні методи [47].

При обробці ЕО вирішуються задачі *формування узагальненої ЕО; визначення відносних ваг об'єктів; встановлення ступеня узгодженості думок експертів* та ін., детальний опис процесу вирішення яких наводиться далі [47].

1. Формування узагальненої ЕО

Група з m експертів оцінила деякий об'єкт, виставивши йому бали x_j – бали j -го експерта, $j = \overline{1, m}$. Узагальнену ЕО отримують усередненням ЕО кожного експерта. Для цього одночасно використовують методи **середніх арифметичних рангів (САР)** та **медіан рангів (ММР)**.

Для більшої стійкості узагальненої ЕО доцільно використовувати одночасно обидва методи – і метод середніх арифметичних рангів (балів), і метод медіанних рангів в зв'язку з тим, що загальні висновки залежать від суб'єктивізму ОПР, яка обирає метод обробки вихідних ЕО і тому можуть змінюватись від методу до методу [47].

Метод САР

1) обраховується САР об'єктів, що були надані експертами:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^m x_j}{m}, \quad (2.4)$$

де \bar{x} – середнє арифметичне оцінок групи експертів;

x_j – оцінка j -го експерта, $j = \overline{1, m}$;

m – кількість експертів.

2) формується ранжований ряд для цього виконується ренкінг (розташування) об'єктів за принципом спадання при якому кращим є об'єкт з меншим значенням САР.

Метод медіан рангів

1) виконується ренкінг рангів за зростанням та записується вся кількість значень, навіть у випадку їх повторів;

2) у якості медіани рангів береться такий ранг, який розміщений посередині послідовності рангів;

3) за отриманими медіанами рангів формується кінцевий ранжований ряд. При чому кращим вважається рішення, об'єкт, система тощо для якого значення медіани рангу є найменшими.

2. Визначення відносних ваг об'єктів

Параметри складної системи є різними за ступенем важливості їх впливу на систему, прийняття рішення тощо. Оцінка ступеню важливості кожного із параметрів системи здійснюється шляхом визначення їх *ваг* за виразом (2.5).

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m w_{ij}}{m}; i = \overline{1, n}, \quad (2.5)$$

де w_i – вага i -го об'єкта, обчислена за оцінками всіх експертів;

w_{ij} – вага i -го об'єкта, обчислена за оцінками j -го експерта за виразом (2.6);

i – номер за порядком об'єкта, що аналізується;

m – кількість експертів;

n – кількість об'єктів, що аналізуються.

$$w_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}, \quad (2.6)$$

де w_{ij} – вага i -го об'єкта, обчислена за оцінками j -го експерта;

x_{ij} – оцінка параметра i , що присвоєна j -им експертом;

m – кількість експертів;

n – кількість об'єктів, що аналізується.

3. Визначення ступеню узгодженості думок експертів

В експертному опитуванні як правило приймає участь декілька експертів. При цьому їх оцінки неминуче будуть різнитися. Важливо визначити величину різниць ОЕ, тому, що передумовою досить високої надійності загальної ЕО є високий ступінь узгодженості думок експертів. Для визначення ступеню узгодженості ЕО застосовуються такі статистичні показники як [47] *варіаційний розмах* R , що обчислюється за виразом (2.7), *середнє квадратичне відхилення* σ , що обчислюється за виразом (2.8) та *коефіцієнт варіації* V , що обчислюється за виразом (2.9),

$$R = x_{\max} - x_{\min}, \quad (2.7)$$

де R – варіаційний розмах

x_{\max} – найбільше значення ЕО об'єкту;

x_{\min} – найменше значення ЕО об'єкту.

– *середнє квадратичне відхилення* σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_j - \bar{x})^2}{m-1}}, \quad (2.8)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення ЕО;

x_j – оцінка j -го експерту;

\bar{x} – середнє арифметичне ЕО групи експертів;

m – кількість експертів;

– *коефіцієнт варіації* V (у відсотках):

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

де V – коефіцієнт варіації;

σ – середнє квадратичне вiдхилення ЕО;

\bar{x} – середнє арифметичне ЕО групи експертiв.

У випадку участi в експертному опитуванні *двох експертiв* ступiнь узгодженостi їх думок визначають обчисливши *коефiцiєнт рангової кореляції Спiрмена ρ* [47], який може приймати значення вiд -1 до 1 . У випадку рiвностi одиницi значення коефiцiєнта Спiрмена, тобто $\rho = 1$, можна говорити про повну узгодженiсть думок експертiв, i про повну неузгодженiсть думок експертiв у протилежному випадку.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_{ik})^2}{n(n^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (2.10)$$

де ρ – коефiцiєнт Спiрмена, де, $\rho = 1$ – повна узгодженiсть думок експертiв; $\rho = -1$ – повна не узгодженiсть думок експертiв;

x_{ij} – ранг i -го об'єкта наданий j -им експертом;

x_{ik} – ранг i -го об'єкта наданий k -им експертом;

n – кiлькiсть аналізованих об'єктiв;

d_i – рiзниця мiж рангами i -го об'єкту: $d_i = x_{ij} - x_{ik}$.

Для розрахунку ступеню узгодженостi думок *великої кiлькостi експертiв (бiльше двох)* користуються *коефiцiєнтом конкордації W* , який обчислюють за виразом (2.11).

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2(n^3 - n)}; \quad (2.11)$$
$$S = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right]^2,$$

де W – коефiцiєнт конкордації;

m – кiлькiсть експертiв;

n – кiлькiсть об'єктiв, що порiвнюються;

x_{ij} – ранг, присвоєний i -му об'єкту j -им експертом.

Коефіцієнт конкордації W змінюється в інтервалі від 0 до 1. Якщо $W = 1$, то це означає, що всі експерти присвоїли об'єктам однакові ранги. Чим ближче значення коефіцієнта W до нуля, тим менш узгодженими є оцінки експертів [47].



Приклад формування узагальненої експертної оцінки

При синтезі гнучкої виробничої системи (ГВС) аналізувались вісім моделей пристроїв орієнтування (ПО): ПО1 ... ПО8. Для цього було залучено дванадцять експертів, які ввели відповідні ранги для кожного ПО спираючись на власний досвід та особисті міркування щодо доречності застосування кожної моделі ПО у ГВС.

Згідно із проставлених експертами оцінок сформувати групову ЕО використовуючи метод середніх арифметичних рангів та метод медіан рангів. Вихідні дані приведені в табл. 2.2 [47].

Метод середніх арифметичних рангів.

1. Для кожної моделі ПО розраховано сумарне значення рангів, що були надані експертами (табл. 2.2).

2. Ділення суми рангів на кількість експертів та обчислення середнього арифметичного рангу за виразом (2.4).

3. Ренкінг рангів (упорядкування) за принципом “чим менше – тим краще”, тобто кращою вважається модель ПО з меншим середнім рангом. У даному випадку найменший середній ранг становить 2,625 та належить ПО4. Тому підсумковий ранг ПО4 становить 1. Чергове значення середнього рангу становить 3,125 і належить ПО3, тому він має підсумковий ранг 2. ПО2 і ПО6 мають однакові значення середніх рангів, що становлять 3,25. Це, на думку експертів (за даним способом узагальнення міркувань), вказує на їх рівнозначність, тому ПО2 та ПО6 повинні були б займати 3 та 4 місце у ранжованому ряду, і тому їм присвоюється середній бал $(3 + 4) / 2 = 3,5$. Результати представлені в табл. 2.3 [47].

Таблиця 2.2

Ранги ПО за їх привабливістю щодо застосування у ГВС [47]

№ експерта	Ранги моделей ПТр							
	ПО1	ПО2	ПО3	ПО4	ПО5	ПО6	ПО7	ПО8
1	5	3	1	2	8	4	6	7
2	5	4	3	1	8	2	6	7
3	1	7	5	4	8	2	3	6
4	6	4	2,5	2,5	8	1	7	5
5	8	2	4	6	3	5	1	7
6	5	6	4	3	2	1	7	8
7	6	1	2	3	5	4	8	7
8	5	1	3	2	7	4	6	8
9	6	1	3	2	5	4	7	8
10	5	3	2	1	8	4	6	7
11	7	1	3	2	6	4	5	8
12	1	6	5	3	8	4	2	7

Таблиця 2.3

Групова ЕО моделей ПО за їх привабливістю для використання у ГВС за методом середніх арифметичних рангів [47]

№ експерта	Ранги моделей ПР							
	ПО1	ПО2	ПО3	ПО4	ПО5	ПО6	ПО7	ПО8
1	5	3	1	2	8	4	6	7
2	5	4	3	1	8	2	6	7
3	1	7	5	4	8	2	3	6
4	6	4	2,5	2,5	8	1	7	5
5	8	2	4	6	3	5	1	7
6	5	6	4	3	2	1	7	8
7	6	1	2	3	5	4	8	7
8	5	1	3	2	7	4	6	8
9	6	1	3	2	5	4	7	8
10	5	3	2	1	8	4	6	7
11	7	1	3	2	6	4	5	8
12	1	6	5	3	8	4	2	7
Сума рангів	60	39	37,5	31,5	76	39	64	85
Середній арифметичний ранг	5	3,25	3,125	2,625	6,333	3,25	5,333	7,083
Підсумковий ранг	5	3,5	2	1	7	3,5	6	8
Загальний вигляд ранкінгового ряду	ПО4 < ПО3 < { ПО2, ПО6 } < ПО1 < ПО7 < ПО5 < ПО8							
<i>Примітка.</i> Запис виду "ПО4 < ПО3" означає, що ПО4 кращий за ПО3. Еквівалентними (тобто такими, що, мають рівну суму балів) є моделі ПО2 та ПО6, тому в даному випадку вони згруповані та виділені фігурними дужками {}								

Метод медіан рангів.

Виконується ранкінг рангів за відповідями експертів окремо для кожної моделі ПО в порядку так званого “не спадання” (термін, що вказує

на те, що деякі відповіді, які треба розташувати “у порядку зростання” є однаковими). Наприклад, для ПО1 ранги становлять 5, 5, 1, 6, 8, 5, 6, 5, 6, 5, 7, 1 (табл. 2.2). При їх ренкінгу одержимо послідовність: 1, 1, 5, 5, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 7, 8. На центральних місцях – шостому та сьомому – проставлено ранги 5 та 5 (виділено жирним шрифтом). Тому медіана моделі ПО1 дорівнює 5. Медіани 12 результатів ЕО тобто рангів відповідних моделей ПО, наведені в передостанньому рядку результуючої таблиці (табл. 2.4). Медіани розраховувались статистично як середнє арифметичне значення центральних членів ренкінгового ряду.

Аналіз ренкінгових рядів отриманих за методами середніх арифметичних рангів та медіан рангів показує, що вони є приблизно однаковими, а наявні відхилення у значеннях рядів за різними методами аналізу вказує, що ці методи не позбавлені похибок. Тому для підвищення точності результатів необхідно їх додатково опрацювати, зокрема, визначити ступінь узгодженості думок експертів [47].

Таблиця 2.4

Результати обчислення узагальненої ЕО методом медіан рангів моделей ПО за їх привабливістю для використання у ГВС [47]

№ експерта	Ранги моделей ПР							
	ПО1	ПО2	ПО3	ПО4	ПО5	ПО6	ПО7	ПО8
1	5	3	1	2	8	4	6	7
2	5	4	3	1	8	2	6	7
3	1	7	5	4	8	2	3	6
4	6	4	2,5	2,5	8	1	7	5
5	8	2	4	6	3	5	1	7
6	5	6	4	3	2	1	7	8
7	6	1	2	3	5	4	8	7
8	5	1	3	2	7	4	6	8
9	6	1	3	2	5	4	7	8
10	5	3	2	1	8	4	6	7
11	7	1	3	2	6	4	5	8
12	1	6	5	3	8	4	2	7
Медіани рангів	5	3	3	2,25	7,5	4	6	7
Підсумковий ранг	5	2	2	1	8	4	6	7
Загальний вигляд ренкінгового ряду	ПО4 < {ПО2, ПО3} < ПО6 < ПО1 < ПО7 < ПО8 < ПО5							
<i>Примітка.</i> Запис виду "ПО4 < ПО3" означає, що ПО4 кращий за ПО3. Еквівалентними (тобто такими, що, мають рівну суму балів) є моделі ПО2 та ПО3, тому в даному випадку вони згруповані та виділені фігурними дужками {}								



**Приклади
встановлення
ступені
узгодженості
експертних оцінок**

Приклад 1

Ефективність роботи ПО у ГВС представлена 12 показниками які оцінювались групою з двох експертів за методом ранжування. Результати експертного опитування представлені у табл. 2.5. Розрахувати ступінь узгодженості думок експертів за коефіцієнтом рангової кореляції Спірмена [47].

Таблиця 2.5

Показники ПО	Значення рангів, що присвоїли експерти		Різниця між рангами d_i ($d_i = x_{i1} - x_{i2}$)	Квадрат різниці між рангами d_i^2
	№1 (x_{i1})	№2 (x_{i2})		
Швидкість	7	6	1	1
Кількість робочих точок	8	4	4	16
Відстань переміщення об'єкта орієнтування	2	1	1	1
Надійність роботи	1	3	-2	4
Точність орієнтування	9	11	-2	4
Гнучкість	3	2	1	1
Колір корпусу	12	12	0	0
Прискорення	11	10	1	1
Продуктивність ПО	4	5	-1	1
Маса ПО	10	9	1	1
Вантажопідйомність	6	7	-1	1
Величина споживаної потужності	5	8	-3	9
Σ	-	-	-	40

Коефіцієнт рангової кореляції Спірмена розраховується за формулою (2.10):

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_{ik})^2}{n(n^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \cdot 40}{12(12^2 - 1)} \approx 0,86 \cdot$$

Отримане значення 0,86 вказує високий ступінь узгодженості думок експертів.

Приклад 2

Ефективність роботи ПО у ГВС представлена 7 показниками які оцінювались групою з п'яти експертів за методом ранжування. Результати експертного опитування представлені у табл.2.6. Розрахувати ступінь узгодженості думок експертів за коефіцієнтом конкордації [47].

Таблиця 2.6

Параметри ПО	Значення рангів, що присвоїли експерти					Сума рангів	Відхилення від середньої суми $\Delta=(x_j - \bar{x})$	Квадрат відхилення $\Delta^2=(x_j - \bar{x})^2$
	№1	№2	№3	№4	№5			
Точність орієнтування	1	1	2	3	1	8	-12	144
Циклова продуктивність	2	2	1	1	2	8	-12	144
Технологічна гнучкість	6	7	6	5	6	30	10	100
Надійність роботи	4	6	4	6	4	24	4	16
Величина одноразових витрат	7	3	7	4	5	26	6	36
Величина щомісячних витрат	3	5	5	7	7	27	7	49
Споживана потужність	5	4	3	2	3	17	-3	9
–	–	–	–	–	–	$\bar{x}=20$	–	$\Sigma=498$

Коефіцієнт конкордації розраховується за формулою (2.11):

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2(n^3 - n)} = \frac{12 \cdot 498}{5^2 \cdot (7^3 - 7)} \approx 0,711$$

Отримане значення 0,711 є близьким до 1, що вказує на високий ступінь узгодженості думок експертів.

2.5.3. Формалізовані методи системного аналізу

Складні системи різної природи описуються множиною різних показників, що мають як якісну (тобто описову) так і кількісну форму. При цьому необхідно здійснювати чисельні оцінки цих показників. В такому випадку проводять формалізацію та будують формалізовані моделі формалізованими методами системного аналізу.



Формалізація представлення систем, процесів, явищ та ін. досліджуваних об'єктів спеціальними символами математичних, логічних та ін. операцій із дотриманням правил їх написання та

використання загальноприйнятих термінів. [35].

В основі формалізованих методів системного аналізу лежать *аналітичні методи* (математичний аналіз, математичне програмування, теорія ігор і т. д.), що використовуються для детермінованих систем, коли їх параметри описуються точними математичними виразами, рівняннями, формулами, функціями;

статистичні методи (статистичне програмування, теорія масового обслуговування, факторний аналіз і т. д.), що ґрунтуються на математичному апараті теорії ймовірності та математичної статистики і використовуються для складних багатокритеріальних систем з невизначеностями;

теоретико-множинні, логічні, лінгвістичні, методи, методи дослідження операцій, що базуються на дискретній математиці, математичній логіці, математичній лінгвістиці, теорії множин. Дані методи використовуються при проектуванні складних пристроїв і комплексів, моделювання ситуацій прийняття рішень в складних організаційних системах;

метод графів, що є зручним для досліджень та інтерпретації різних проблем у галузі складних систем.

2.5.3.1. Метод розв'язання задачі багатокритеріального вибору

Особливої уваги у наукових дослідженнях потребують методи розв'язання багатокритеріальних задач, що виникають, як правило, при прийнятті проектних рішень. Прийняття рішень завжди є багатоетапним і трудомістким процесом, який не дає однозначної відповіді. Задача прийняття рішення є оптимізаційною задачею, яка передбачає отримання деякого найкращого результату у відповідності до деяких критеріїв оптимальності.

Критерій оптимальності – це вираження деякого найкращого результату що є функцією цілі або цільовою функцією.

Цільова функція це математичне представлення залежності результату роботи системи від її стану [47].

У наукових дослідженнях при прийнятті рішень пов'язаних із дослідженнями та синтезом складних систем **цільова функція** виражає

математичну залежність результату від складу (тобто певної множини функціонально пов'язаних елементів) системи. У даному випадку результатом можна вважати отримання такої множини взаємопов'язаних елементів системи (ефективний склад системи), які забезпечують найвищий ступінь якості функціонування. Під ефективним складом складної системи розуміється оптимальне поєднання комплексу техніко-економічних показників елементів системи. В такому випадку обирається такий склад елементів складної системи, який дозволить забезпечити її функціонування, із заданими показниками, наприклад, для технічної системи – точністю, продуктивністю тощо при найменших економічних витратах [47]. При цьому специфічність даної задачі полягає у тому, що низка показників елементів складної технічної системи, наприклад ергономічні показники, показники патентно-правової захищеності, екологічної безпеки, рівня автоматизації тощо, задаються не кількісно (у числовій формі), а якісно (описуються лінгвістично), а також є різними за змістом і за значенням [47]. У такому випадку процес прийняття рішень представляється як поетапне виконання певної послідовності дій над множиною сформованих *альтернатив*. У кінцевому результаті формується підмножина найкращих альтернатив у згідно із наперед визначеними критеріями. Кінцевим результатом є одна альтернатива, що і є найкращою відповідно до наперед прийнятого **сукупного критерію якості**. Вибрана альтернатива являє собою обґрунтоване рішення. Багатоетапність процесу прийняття рішень є очевидною і передбачає застосування певної загальної **методики прийняття проектних рішень**. Вказана методика проілюстрована прикладом автоматизованого вибору пристроїв орієнтування (ПО) гнучкої виробничої системи (ГВС), яка являє собою складну технічну систему у якій об'єднані функціонально взаємодіючі множини автоматизованого технологічного обладнання (ТО), зокрема основне та допоміжне ТО, промислові роботи, технологічне оснащення та об'єкти виробництва. Один із можливих варіантів абстрактного представлення узагальненої послідовності розв'язання задач методикою показано рис. 2.14. На рис. 2.15 подано приклад її графічної інтерпретації за допомогою кіл Ейлера при виборі ПО для ГВС [5, 47].

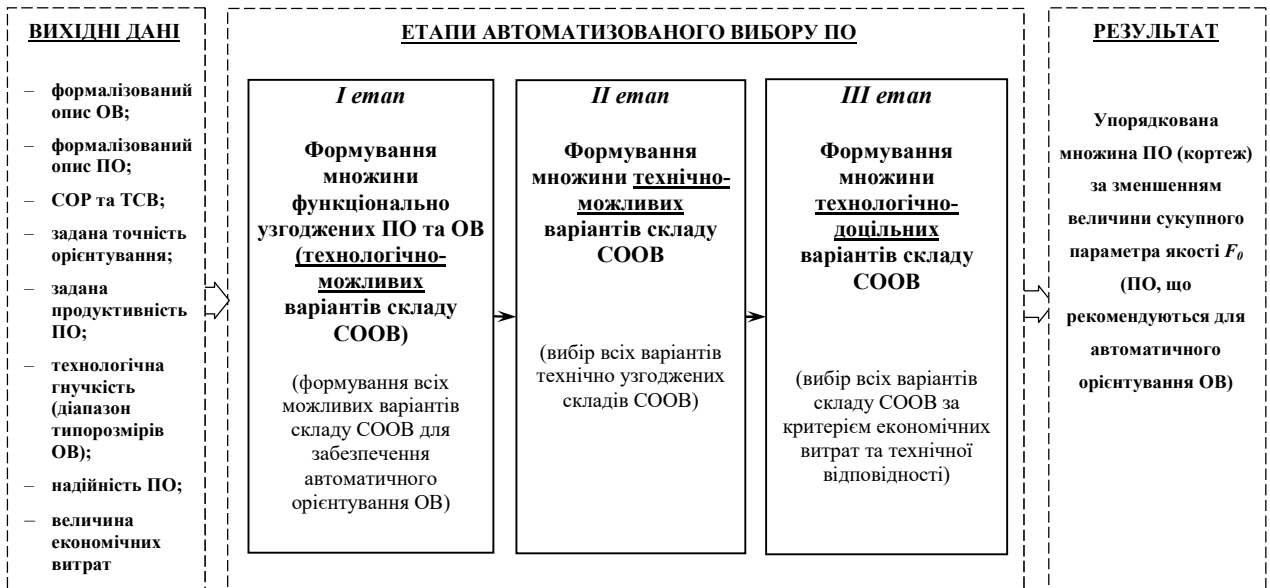


Рис. 2.14. Спрощена схема методики автоматизованого вибору ПО як складових елементів ГВС [47]

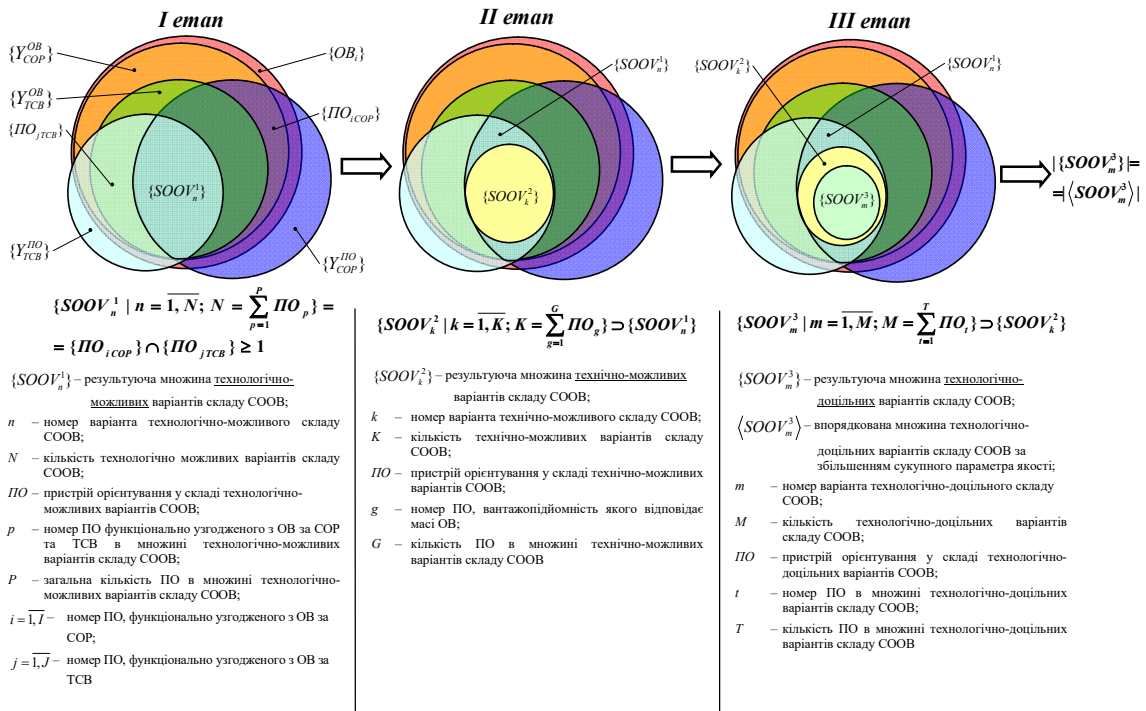


Рис. 2.15. Графічна інтерпретація вирішення задач методики автоматизованого вибору складових елементів ГВС на прикладі вибору ПО [47]

Стратегія прийняття рішень в умовах багатокритеріальності, за методикою прийняття проектних рішень містить наступні етапи:

I. Формування множини альтернатив.

II. Формування підмножини альтернатив за наперед визначеним критерієм оптимальності із попередньо сформованої множини альтернатив.

III. Вибір результуючої альтернативи за сукупним параметром якості F_0 , що враховує різні за складом, формою та змістом показники елементів системи. На цьому етапі здійснюється оцінка альтернатив та безпосередній вибір найкращої із множини альтернатив сформованих на попередніх двох етапах вибору. В такому випадку обирається такий склад елементів системи, який дозволить забезпечити її ефективне функціонування при найменших витратах.

На кожному етапі здійснюється фактично пошук оптимального складу альтернатив. Результати попередніх етапів пошуку результуючої альтернативи, є вихідними даними наступних етапів, а видалені на попередніх етапах альтернативи надалі не вивчаються.

Як вказувалось вище задача прийняття рішень є багатокритеріальною задачею. Основною властивістю багатокритеріальних задач є множина можливих варіантів отримуваних рішень. В цьому випадку виникає ситуація вибору певного оптимального варіанту (альтернативи) за деяким правилом, що характеризується відповідною цільовою функцією, наприклад, мінімум витрат, максимум продуктивності тощо [5]. Критерій оптимальності повинен описуватись однозначно кількісним чином, він повинен бути глобальним, тобто враховувати всі фактори, що впливають на систему, в тому числі другорядні. При цьому повинно мати місце чітке розділення головних результатів, параметрів, властивостей від другорядних [5]. Фактично цільова функція повинна виражати кількісне співвідношення між бажаним результатом та витратами для його досягнення. Це передбачає вирішення наступних математичних задач [5]:

1. кількісного визначення цілі (тобто бажаного результату) та витрат, що виникають при досягненні цілі;

2. визначення функції, що виражає співвідношення між ціллю та витратами, що виникають при функціонуванні системи.

Вирішення першої задачі *кількісного визначення цілі та витрат* здійснюється шляхом обчислення значення всіх показників системи з врахуванням важливості або пріоритету кожного показника [5] шляхом визначення їх вагових коефіцієнтів важливості. Важливість кожного показника обумовлюється сукупністю умов.

Одна і та ж мета може бути досягнута різними способами. Наприклад, у випадку проектування ГВС для реалізації ТП може бути використане різне ТО [5]. При цьому одні варіанти краще будуть вирішувати одні задачі та гірше – інші задачі; другі – навпаки. Тому форма аналітичного запису критерію повинна бути інваріантною відносно варіантів системи, що порівнюються. Таким чином, критерій оптимальності системи повинен відповідати вимогам:

1. кількісного вираження ефективності системи;
2. врахування всіх показників системи;
3. врахування важливості кожного показника;
4. врахування взаємозв'язку між показниками;
5. інваріантності шуканої функції, тобто аналітичної форми запису критерію відносно варіантів системи, що порівнюються.

Наприклад, з врахуванням зазначеного при прийнятті рішень, що стосуються вибору ТО при проектуванні ГВС [5] аналіз множини можливого до застосування ТО необхідно проводити як з технічних, так і економічних міркувань, визначаючи відповідні показники, що можуть мати вплив на якість функціонування ГВС у цілому. Такими показниками можуть бути, наприклад, нижче наведені показники.

1. Все ТО характеризується трьома основними експлуатаційними ознаками, які входять до їх технічних характеристик [48]:

- 1) *точністю*;
- 2) *цикловою продуктивністю* – кількістю ОВ, що обробляються / виготовляються / орієнтуються тощо за одиницю часу;
- 3) *технологічною гнучкістю* – діапазоном типорозмірів ОВ, що можуть бути оброблені / виготовлені / орієнтовані на ТО.

При цьому додатково можна враховувати вимоги щодо *надійності* [5] або працездатності ТО. Надійність ТО може представлятись як час напрацювання до відмови, що вимірюється в годинах. Такий показник надійності вказується у паспортних даних пристрою.

Вказані експлуатаційні характеристики можуть бути використані як критерій, наприклад, технічної відповідності ТО K_T [5].

2. При автоматизованому виборі ТО обов'язковими є врахування їх економічних показників, до яких можна віднести [5]:

1) *одноразові витрати*, пов'язані із придбанням та монтажем обладнання [5];

2) *щомісячні витрати*, зв'язані із обслуговуванням обладнання, зокрема це витрати на заробітну плату робітників, що обслуговують обладнання; витрати електроенергії; орендна плата, витрати на амортизацію, на мастильні матеріали тощо [5].

Вказані економічні показники можуть бути використані, наприклад, як критерій економічних витрат K_E [5].

При цьому весь комплекс показників необхідно розбити на дві групи [5]:

1. *позитивні показники* a_i , збільшення яких позитивно позначається на якості функціонування системи або прийнятті рішення. Наприклад, такими показниками можуть бути продуктивність, рівень автоматизації, надійність тощо;

2. *негативні показники* b_j , збільшення яких негативно позначається на якості функціонування системи або прийнятті рішення. Наприклад, такими показниками можуть бути похибка орієнтування, щомісячні витрати тощо.

Всі показники є взаємозв'язаними: збільшення кількісної міри позитивних показників може призвести до збільшення значення негативних показників та навпаки. Наприклад, збільшення точності орієнтування може призвести до збільшення вартості ТО та відповідно величини одноразових витрат.

В такому випадку задача вибору альтернативи зводиться до визначення варіанту компонування ГВС, при якому сума значень позитивних показників ТО є найбільшою, а сума негативних показників є найменшою з врахуванням важливості кожного показника. Очевидно, що найкращим є варіант, який

задовольняє вимогам мінімуму економічних витрат $K_E \rightarrow \min$ та максимуму технічної відповідності $K_T \rightarrow \max$.

Кількісним виразом цілі може бути так званий **сукупний параметр якості** F_0 , що виражається через значення позитивних і негативних показників з врахуванням важливості кожного показника [49], або так званий зважений критерій [48]. Способи оптимізації сукупного параметра якості F_0 (або зваженого критерію), що приведені в літературі [5, 47, 48, 49] зводяться до визначення всіх часткових функцій цілі та їх вагових коефіцієнтів, що визначають відносну важливість цих функцій. При цьому знаходиться „компромісне” рішення, що задовольняє всім висунутим вимогам [5, 47, 48, 49]. З врахуванням зазначеного використовується сукупний параметр якості F_0 , що буде збільшуватись при збільшенні суми значень позитивних показників і зменшуватись при збільшенні суми значень негативних показників [5, 47, 49].

Таким чином **сукупний параметр якості** F_0 можна представити як функцію, що залежить від кількісного значення критеріїв економічних витрат K_E та технічної відповідності K_T і значення якої необхідно максимізувати:

$$F_0 = f(K_T, K_E) \rightarrow \max. \quad (2.12)$$

Відповідно кожний критерій представляється сумами позитивних та негативних показників з врахуванням важливості кожного показника наступним чином:

$$\begin{cases} K_T = f(\sum_{i=1}^n a_i X_i; \sum_{j=1}^m b_j Y_j) \rightarrow \max, \\ K_E = f(\sum_{i=1}^n a_i X_i; \sum_{j=1}^m b_j Y_j) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (2.13)$$

де a_i, b_j – позитивні та негативні вагові коефіцієнти відповідно, що виражають кількісну міру важливості позитивних та негативних показників кожного критерію відповідно;

X_i, Y_j – кількісне значення позитивних та негативних показників параметрів;

n, m – кількість позитивних та негативних показників відповідно.

Позитивні a_i та негативні b_j параметри X_i, Y_j кожного критерію повинні виражатись загальною системою вимірюваних одиниць. Для цього проводиться їх нормування наступним чином [49]:

1. формується матриця M параметрів Z_{ij} системи: $M = [Z_{ij}]$, де Z_{ij} – позитивний або негативний i -ий показник j -ї альтернативи. В матриці кожний рядок є вектором числових значень показників альтернативи.

2. матрицю M представляють у вигляді:

$$M = [Z_{\max i}] \times [P_{ij}],$$

де $Z_{\max i}$ – елементи з найбільшим значенням i -го вектору-рядка;

$[Z_{\max i}]$ – вектор-рядок з елементами $Z_{\max i}$;

$[P_{ij}]$ – визначник з нормованими елементами.

Для нормування елементів матриці використовується відношення $\frac{Z_{ij}}{Z_{\max i}}$,

та повинна виконуватись така умова: $0 \leq \frac{Z_{ij}}{Z_{\max i}} \leq 1$.

Таким чином будуть отримані безрозмірні показники у яких збереглася інформація про їх кількісне значення.

Вирішення другої задачі – визначення функції, що виражає співвідношення між ціллю та витратами, що виникають при функціонуванні системи [49] передбачає, що сукупний параметр якості F_0 системи буде збільшуватись при збільшенні значень позитивних показників і зменшуватись при збільшенні значень негативних показників у відповідності до виразу (2.14) [5, 47]:

$$F_0 = \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{j=1}^m b_j Y_j. \quad (2.14)$$

В якості показників X_i, Y_j можуть використовуватись будь-які параметри системи, також можуть бути використані узагальнені показники, часткові критерії, виражені через невелике число параметрів системи [5, 47, 49].

Таким чином, цільова функція процесу визначення складу технологічного обладнання ГВС при виборі ПО математично відображається сукупним

параметром якості F_0 , величина якого корелює із значеннями критеріїв економічних витрат K_E , та технічної відповідності K_T :

$$F_0 = a_1Q + a_2\Gamma + a_3H - (b_1\Delta + b_2E) \rightarrow \max, \quad (2.15)$$

де Q – циклова продуктивність ПО;

Γ – технологічна гнучкість ПО;

H – надійність роботи ПО;

Δ – точність орієнтування, що забезпечується ПО;

E – економічні витрати на ПО: $E = \beta_1\varepsilon_1 + \beta_2\varepsilon_2$, де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – одноразові та щомісячні витрати відповідно; β_1, β_2 – вагові коефіцієнти, що вказують на важливість відповідного показника: $\beta_1 + \beta_2 = b_2$;

a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 – позитивні та негативні вагові коефіцієнти що вказують на важливість відповідно технічних та економічних показників.

Визначення вагових коефіцієнтів a_i, b_j впливає із поняття важливості показників, що обумовлюється конкретними умовами або стратегією розвитку процесу в цілому. Вагові коефіцієнти можуть визначатись експертним опитуванням, методами математичної статистики обробки експериментальних даних, аналітичних розрахунків або комбінованими методами [49, 50, 51, 52, 53, 49].

На вагові коефіцієнти важливості накладаються обмеження [5, 47, 49]:

$$\sum_{i=1}^n a_i + \sum_{j=1}^m b_j = 1. \quad (2.16)$$

Для переведення якісної оцінки у кількісну можна застосувати номінальну шкалу за методом шкалювання (див. пункт 2.5.2 даного навчального посібника), тобто оцінювати якісні показники у балах. Причому степінь бальності показника залежатиме від його важливості: чим менше важливість показника тим меншою є степінь бальності, чим вища важливість показника тим вищою є степінь бальності [5, 47, 49]. На підставі зазначеного задачу вибору альтернатив при прийнятті проектних рішень проектування ГВС можна представити як пошук максимальної функції цілі за виразом (2.15) при

обмеженнях на коефіцієнти важливості параметрів за виразом (2.16).

Таким чином, вище вказане дає змогу визначити оптимальну в прийнятому розумінні альтернативу.

2.5.3.2. Методи дослідження операцій

Методи дослідження операцій застосовують при системному аналізі проблем, що мають структурований характер. Як правило це різноманітні оптимізаційні задачі управління в складних ситуаціях або в умовах невизначеності, вивчення наслідків прийнятих рішень, визначення критеріїв ефективності тощо. Методи дослідження операцій полягають у побудові *оптимізаційних моделей* для дослідження технічних, економічних, організаційних та інших проблем, коли рішення може бути отримано у кількісній (числовій) формі. Під операцією в даному випадку розуміється повторювана з певною періодичністю діяльність у будь-якій галузі. Головним чином методи дослідження операцій застосовуються, для пошуку оптимального розподілу ресурсів (фінансових, людських, енергетичних тощо) та управління витратами. Характерною рисою цих задач є те, що всі вони є задачами *однокритеріальної оптимізації*, розв'язок яких передбачає отримання в певному значенні деякого найкращого результату який іще називають *оптимальним планом* за одним *критерієм оптимальності*, Для таких задач є характерною лінійна залежністю між змінними і критерієм оптимальності.



Критерій оптимальності – це словесне або математичне формулювання бажаного найкращого результату, що залежить від стану системи.

Математичну залежність бажаного найкращого результату від стану системи називають **цільовою функцією**.

Відповідно до вказаного **критерій оптимальності** або **цільова функція** це функція $F(x)$, що прямує до деякого екстремального (оптимального) максимального або мінімального значення, яке необхідно

змінних $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ при яких цільова функція $F(x)$ досягає свого екстремального значення називається **оптимальним планом**.

Для розв'язання задач дослідження операцій або задач *оптимального планування* використовують різні методи, зокрема:

- графічний (геометричний) метод;
- методи математичного (лінійного) програмування (симплекс-метод);
- методи простого та направленої перебору (теорію ігор, метод Монте-Карло, теорію черг).

Графічний метод застосовують переважно для наочного представлення змісту задачі. При застосуванні графічного методу виконується геометрична інтерпретація задачі. Послідовність дій, що виконуються при цьому відомий, а їх детальний опис наведено в літературі [47]. Зокрема виконують наступне.

1. Формулюють умову задачі та на площині $\{x_1, x_2\}$ будують прямі, що описуються рівняннями які отримують в результаті заміни в обмеженнях за виразом (2.18) знаків нерівностей “ \geq ”, “ \leq ” на знаки точних рівностей “ $=$ ”.
2. Знаходять напівплощини що графічно відображають обмеження задачі.
3. Знаходять область допустимих рішень.
4. Будують пряму, яка описується рівнянням $c_1x_1 + c_2x_2 = h$, де h – будь-яке додатне число, бажано таке, щоб проведена пряма проходила через багатокутник рішень.
5. Пересувають побудовану пряму у напрямку досягнення екстремуму цільової функції. У результаті, на площині буде знайдено точку у якій цільова функція досягає екстремального значення, або визначається необмежена множина значень функції.
6. Визначають координати точки у якій функція досягає свого екстремуму та розраховують його.

Методи простого та направленої перебору можуть бути застосовані для розв'язання будь-якої оптимізаційної задачі. Їх сутність полягає в послідовному переборі всіх варіантів рішень. Проте, їх застосування є досить трудомістким, довготривалим та складним завданням, оскільки потребує перебору та ранжування всіх варіантів в умовах обмежень часу на практиці.

Найбільш відомим та широко використовуваним методом розв'язання оптимізаційних задач, є метод, що був запропонований радянським вченим-математиком Л.В. Канторовичем та американським вченим-економістом та математиком Тьяллінгом Купмансом. За цей метод, який на сьогодні застосовується при розв'язанні широкого кола задач оптимального проектування, Канторович Л.В. та Тьяллінг Купманс у 1975 році отримали Нобелівську премію з економіки. На сьогодні даний метод відомий під назвою **симплекс-метод**. Даний метод дозволяє переходити від одного допустимого базисного розв'язку до іншого, таким чином, що значення цільової функції $F(x)$ постійно зростають. В результаті оптимальний розв'язок знаходять за кінцеву кількість кроків. При цьому базисним розв'язком системи з m лінійних рівнянь з n змінними ($m < n$) називається будь-який її розв'язок при якому всі неосновні змінні стають рівними нулю. Основними змінними називаються будь-які m змінних системи з m лінійних рівнянь з n змінними ($m < n$), при яких визначник матриці коефіцієнтів відмінний від нуля, а неосновними (або вільними) змінними називаються всі інші m -их змінних [47].

Симплекс-метод реалізується певною послідовністю кроків і легко алгоритмується, що забезпечує його успішне програмування та автоматизоване виконання. Блок-схема алгоритму симплекс-методу приведена на рис. 2.16.

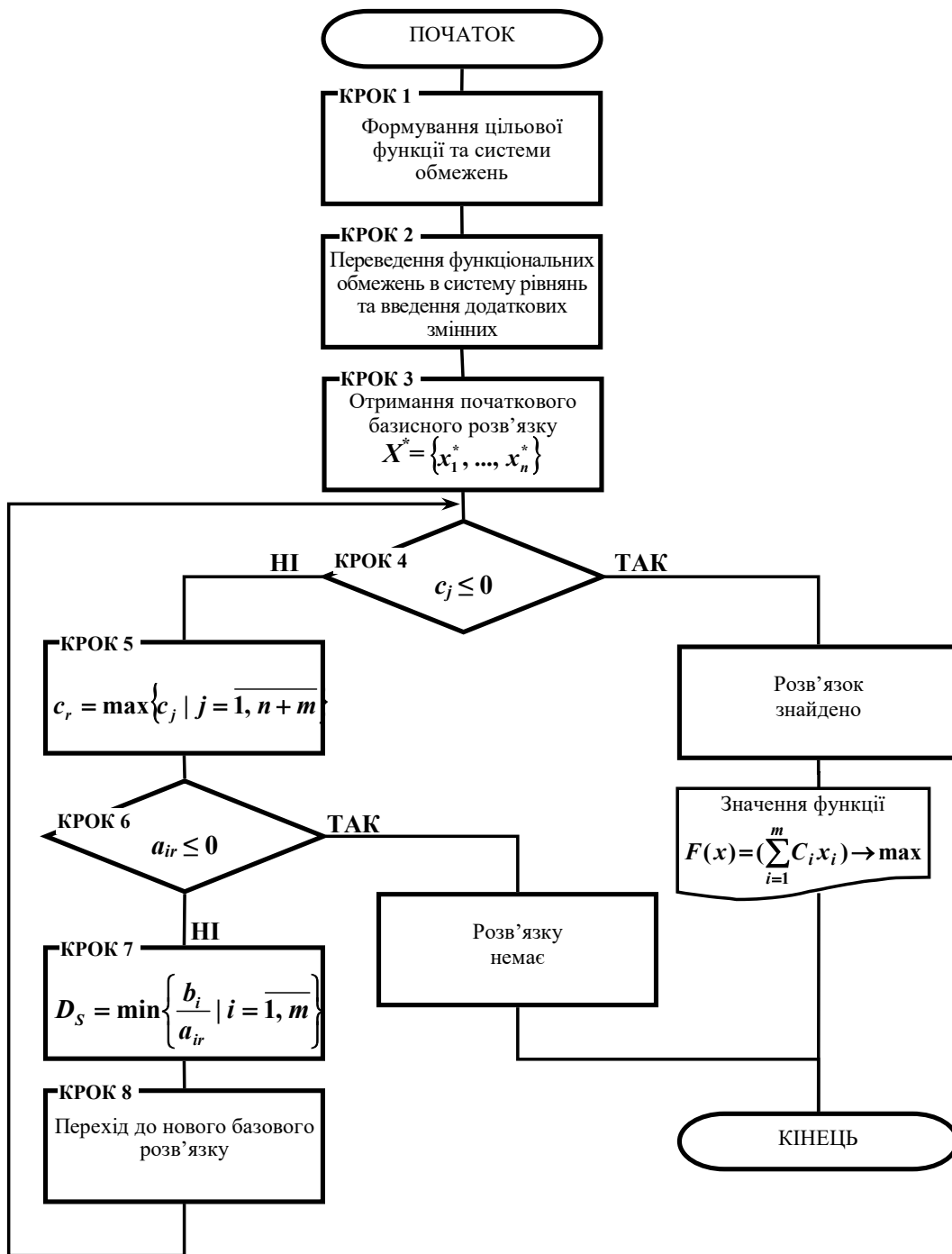


Рис. 2.16. Узагальнена блок-схема алгоритму симплекс-методу [47]

Опис дій та послідовність кроків при застосуванні симплекс-методу для розв'язання оптимізаційних задач представлено в літературі [47] та є наступними.

1. Формування цільової функції та системи обмежень.
2. Приведення задачі до канонічної форми (переведення функціональних обмежень із системи нерівностей у систему рівнянь)

введенням додаткових змінних $y_1 = x_{n+1}, y_2 = x_{n+2}, \dots, y_m = x_{n+m}$, де n – необхідна кількість додатковий змінних) m – кількість рівнянь [47]:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2; \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m; \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + y_1 = b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + y_2 = b_2; \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + y_m = b_m. \end{cases}$$

Обмеження, що накладаються на введені додаткові змінні:

1) невід'ємність значень:

$$y_1 = x_{n+1} \geq 0; y_2 = x_{n+2} \geq 0; \dots; y_m = x_{n+m} \geq 0;$$

2) відповідність знаків додаткових змінних та вільних членів функціональних обмежень.

3. Формування попереднього базисного розв'язку $X^* = \{x_1^*, \dots, x_n^*\}$. Для цього будується вихідна базисна симплекс-таблиця (табл. 2.8), у якій у лівий стовпчик вносяться базисні змінні, а у перший рядок – всі інші змінні задачі, у останній правий стовпчик записують вільні члени b_1, b_2, \dots, b_m системи обмежень. В останній рядок заносять коефіцієнти цільової функції $F(x)$, значення цільової функції з протилежним знаком для отримання *поточного базисного розв'язку* ($L = -F(x)$). У робочу область таблиці записують коефіцієнти a_{ij} змінних системи обмежень [47].

Таблиця 2.8

Загальний вигляд вихідної базисної симплекс-таблиці

Базис	Змінні							b_i
	x_1	x_2	...	x_n	x_{n+1}	...	x_{n+m}	
x_{n+1}	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	1	0	0	b_1
x_{n+2}	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	0	...	0	b_2
...
x_{n+m}	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	0	0	1	b_m
c_j	c_1	c_2	...	c_n	0	0	0	L

Базисні змінні (ліва дужка), Вільні члени (права дужка), Робоча область (нижній лівий кут), Оцінюючий рядок (нижній рядок), Базисний розв'язок (нижній правий кут).

4. Перевіряється виконання умови щодо існування негативних елементів в останньому рядку симплекс-таблиці $c_j \leq 0$. Якщо у таблиці з'являються негативні елементи, то можна вважати задачу розв'язаною. Інакше, тобто при $c_j > 0$, продовжують вирішення задачі за алгоритмом на рис. 2.17.

5. Визначення роздільного стовпчика, тобто стовпчика з максимальним позитивним елементом c_j :

$$c_r = \max\{c_j \mid j = \overline{1, n+m}\},$$

де r – номер роздільного стовпчика.

6. Перевіряється чи є негативні елементи у роздільному стовпчику. За умови виконання $a_{ir} \leq 0$ завдання не має рішення. У протилежному випадку, тобто при $a_{ir} > 0$, вирішення задачі продовжують [47].

7. Із базисного розв'язку вилучаються змінна x_j , відповідно умові:

$$D_S = \min\left\{\frac{b_i}{a_{ir}} \mid i = \overline{1, m}\right\}, \text{ для } a_{ir} > 0,$$

де D_S – частка від співвідношення $\frac{b_i}{a_{ir}}$;

S – номер роздільного рядка, що визначається за умовою $\frac{b_i}{a_{ir}} = \min$;

b_i – елемент останнього рядка симплекс-таблиці;

a_{ir} – елементи роздільного стовпчика симплекс-таблиці.

Таким чином змінна x_j вилучається з того рядка для якого буде отримано найменший результат при діленні на нього.

Елемент, розташований на перетині роздільного стовпця і рядка, називають **роздільним (дозволяючим) елементом**. Наприклад, у табл. 2.8 темним кольором виділено роздільний стовпчик і роздільний рядок виділені. Для них роздільним елементом є a_{22} [47].

**Вихідна симплекс-таблиця із виділеними дозволяючим рядком
та дозволяючим стовпчиком**

Базис	Змінні							b_i
	x_1	x_2	...	x_n	x_{n+1}	...	x_{n+m}	
x_{n+1}	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	1	0	0	b_1
x_{n+2}	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	0	...	0	b_2
...
x_{n+m}	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	0	0	1	b_m

1. Розрахунок елементів симплекс-таблиці і формування нового базисного рішення:

1) елементів роздільного рядка:

$$a'_{sj} = \frac{a_{sj}}{a_{sr}}; b'_s = \frac{b_s}{a_{sr}},$$

де s – порядковий номер роздільного рядка;

r – порядковий номер роздільного рядка;

a'_{sj} , b'_s – нові значення перерахованих елементів;

a_{sj} , b_s – попередні значення перерахованих елементів;

a_{sr} – попереднє значення дозволяючого елемента.

- 2) елементів роздільного стовпчика, які прирівнюються до нуля, окрім роздільного елемента:

$$a'_{ir} = 0; c'_r = 0;$$

- 3) інших елементів, що не є елементами роздільного рядка та стовпчика, за правилом прямокутника: подумки формують прямокутник діагональ у якому утворена дозволяючим елементом та елементом, що піддається перерахунку [47]:

$$a'_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{ir}a_{sj}}{a_{sr}}; b'_i = b_i - \frac{a_{ir}b_s}{a_{sr}}; c'_j = c_j - \frac{a_{sj}c_r}{a_{sr}}; L' = L - \frac{c_r b_s}{a_{sr}},$$

де a'_{ij} , b'_i , c'_j , L' – нові значення перерахованих елементів;

a_{ij} , b_i , c_j , L – попередні значення перерахованих елементів.

Після цього повертаються до кроку 4. І проводять повторну ітерацію за кроками 4 – 8 до моменту коли елементи останнього рядка симплекс-таблиці стануть від’ємними $c_j \leq 0$ [47].

2.5.3.3. Моделі типових задач дослідження операцій

Моделі логістичних задач

Логістичні задачі мають широке практичне застосування. Під ними розуміється низка задач із специфічною структурою та постановкою. Найбільш простими з них є задачі моделювання процесів перевезення деякого продукту з пунктів відправлення (виробництва) до пунктів призначення (споживання) при мінімальних транспортних витратах.

Формальна постановка задачі, що описує даний процес наступна. Деякий продукт який зосереджений у m постачальників (виробників) A_i в певній кількості a_i ($i = 1, \dots, m$), необхідно поставити n споживачам відповідно до замовлення у кількості b_j ($j = 1, \dots, n$) одиниць кожному. Транспортні витрати c_{ij} постачальника відомі. Необхідно знайти такий маршрут перевезень при якому транспортні витрати будуть мінімальними і при цьому будуть забезпечені всі вимоги споживачів, щодо доставляння їм замовлених обсягів товару.

Математично даний процес представляється з урахуванням типу задачі, адже існує три типи таких задач:

I задачі закритого типу, в яких **сумарні запаси** однорідного продукту у виробника (пункті відправлення) $\sum_{i=1}^m a_i$ дорівнюють **сумарним потребам**

$\sum_{j=1}^n b_j$ всіх споживачів:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j ;$$

II задачі відкритого типу, в яких **сумарні запаси** $\sum_{i=1}^m a_i$ однорідного продукту у виробника (пункті відправлення) можуть перевищувати **сумарні потреби** $\sum_{i=1}^m b_j$ всіх споживачів:

$$\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{i=1}^m b_j ;$$

III задачі відкритого типу в яких **сумарні потреби** $\sum_{i=1}^m b_j$ споживачів є більшими за **сумарні запаси** $\sum_{i=1}^m a_i$ однорідного продукту у виробника (пункті відправлення):

$$\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{i=1}^m b_j .$$

При розв'язанні транспортних задач відкритого типу їх перетворюють у задачі закритого типу.

Цільова функція транспортної задачі – зменшення транспортних витрат:

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \right) \rightarrow \min , \quad (2.20)$$

де x_{ij} – об'єми замовленого вантажу, що може бути перевезений i -им постачальником j -му споживачеві;

c_{ij} – транспортні витрати i -го постачальника при перевезенні одиниці вантажу j -му споживачу;

$c_{ij} \cdot x_{ij}$ – транспортні витрати на перевезення x_{ij} одиниць вантажу від i -го постачальника до j -го споживача.

Система обмежень формується виходячи із наступних умов:

1. всі вантажі повинні бути перевезені. Математично це представляється наступним чином:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = \overline{1, m}, \quad (2.21)$$

де a_i – об'єм вантажу, що знаходиться у i -го постачальника;

2. всі потреби споживачів повинні бути задоволені. Математично це представляється наступним чином

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = \overline{1, n}, \quad (2.22)$$

де b_j – кількість одиниць продукції, яку необхідно доставити j -му споживачу.

Загальна модель задачі містить цільову функцію за виразом (2.20) та групу обмежень, зокрема на перевезення вантажів за виразом (2.21) та на задоволення вимог споживачів за виразом (2.22), а також умова невід'ємності змінних $x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$.

Математична модель транспортної задачі **I типу**, для якої сумарні запаси відповідають сумарним потребам споживачів $\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$:

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \right) \rightarrow \min ;$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = \overline{1, n}; \\ x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Математична модель транспортної задачі **II типу**, для якої сумарні запаси є більшими за сумарні потреби всіх споживачів $\sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n b_j$:

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \right) \rightarrow \min ; \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i = \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = \overline{1, n}; \\ x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

При розв'язанні цієї задачі додатково вводять одного фіктивного споживача B_{n+1} , потреби якого становлять $b_{n+1} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j$, а вартість перевезень до нього дорівнює нулю, тому що вантаж насправді не перевозиться.

Математична модель транспортної задачі **III типу** для якої сумарні потреби всіх споживачів перевищують сумарні запаси $\sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n b_j$:

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \right) \rightarrow \min ;$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j, j = \overline{1, n}; \\ x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (2.25)$$

При розв'язанні цієї задачі додатково вводять одного фіктивного постачальника A_{m+1} , об'єми вантажу у становлять $a_{m+1} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i$, а його транспортні витрати на перевезення одиниці вантажу нульові адже, насправді вантаж не транспортується.

Моделі задачі планування виробництва

Формальна постановка задачі наступна. При реалізації технологічних процесів щодо виготовлення множини різномірної продукції j -их видів на

деякому підприємстві витрачається множина різнорідних ресурсів A (сировина, енергетичні, трудові, технічні, фінансові та інші), запаси яких B_i обмежені. При цьому відомими є норми витрат a_{ij} кожного виду ресурсу A_i на виготовлення одиниці продукції j -го виду. Необхідно знайти такий асортимент продукції (план виробництва) при якому прибуток підприємства буде максимальний.

Різнорідні ресурси вимірюються в різних одиницях, наприклад, тоннах, кубометрах, людино-годинах, гривнях, штуках тощо. Аналогічним чином продукція, що виробляється підприємством може вимірюватися в різних одиницях, наприклад, кілограмах, штуках, літрах тощо. Підприємство від здійсненні виробничої діяльності отримує певний прибуток коли реалізує виготовлену продукцію ціни на яку також можуть різнитися. Для виготовлення одиниці кожного найменування продукції задаються норми витрат ресурсів. Сутність задачі планування виробництва у тому, щоб визначити, найменування та об'єми продукції підприємству необхідно виготовляти з наявних ресурсів для того, щоб прибуток від виробничої діяльності був максимальним.

Цільова функція – максимізація величини доходу підприємства:

$$f(x) = \sum_{j=1}^J c_j x_j \rightarrow \max, \quad (2.26)$$

де C_j – прибуток або дохід від виготовлення j -го виду продукції;

x_j – кількість виробів j -го виду продукції.

Обмеження по ресурсах описуються системою нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j \leq b_i; \\ x_j \geq 0; \end{cases} \quad (2.27)$$

або

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j \leq b_i; \\ x_j \geq 0, x_j \leq d_j, \end{cases} \quad (2.28)$$

де d_j – обмеження обсягів реалізації продукції j -го виду.

Також можуть бути обмеження протилежного змісту. Наприклад, підприємство має договори із споживачами продукції на поставку всіх або деяких видів продукції, що виготовляються. Відповідно до цих договорів підприємство має випустити продукцію в обсязі, не менше заданого. Нехай продукцію j -го виду підприємство повинно виготовити в обсязі, не менше заданої величини d'_j . Тоді до системи обмежень необхідно дописати нерівності, що обмежують обсяги виробництва "знизу". В даному контексті обмеження задачі, що враховують обмеженість обсягів виготовлення продукції, матимуть вигляд [47]:

Також зміст обмежень може бути діаметрально протилежним. Наприклад, у підприємства укладені угоди із споживачами на постачання певних найменувань виготовленої продукції. За умовами цих угод підприємство повинно виготовити продукцію у обсязі не менше обумовленого угодою, тобто об'єми виготовлення продукції j -го найменування повинні бути не меншими величини d'_j . У такому випадку до системи обмежень вводять нерівності, що обмежують об'єми виробництва щодо мінімального об'єму замовлення за угодами, тобто "знизу". Виходячи із цих позицій обмеження задачі, щодо обсягів виготовлення продукції, мають наступний вид[47]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{ij} x_j \leq b_i; \\ x_j \geq 0, x_j \geq d'_j, \end{cases} \quad (2.29)$$

У випадку використання підприємством ресурсів або продукції власного виробництва виключно для власних потреб (напівфабрикат), то таку продукцію вважають придбаною підприємством за нульовою ціною з відповідним відображенням у моделі задачі.

2.5.3.3. Графи в задачах системного аналізу

Теорія графів займає важливе місце в системному аналізі. Це розділ математики, в якому вивчаються графи, їхні якісні та кількісні характеристики, операції з графами, методи розв'язування задач прикладного характеру. Мова цієї теорії зручна для досліджень та інтерпретації різних проблем у галузі складних систем, теорії ігор, теорії алгоритмів, теорії автоматів тощо.

Багато задач зводиться до розгляду сукупності об'єктів, суттєві властивості яких описуються відношеннями між ними.

В подібних випадках зручно розглядувані об'єкти зображувати як точки, які називаються *вершинами*, а зв'язки між ними – лініями (довільної конфігурації), які називаються *ребрами*. Точки на площині утворюють множину вершин X , а зв'язки між ними утворюють множину ребер E . Математично граф можна визначити як пару множин X та E :

$$G = (X, E). \quad (2.33)$$

Досить часто зв'язки між об'єктами характеризуються певною визначеною орієнтацією. Наприклад, в технологічному процесі (ТП) вершини можна розглядати як одиниці ТО, а дуги як чітко визначені переходи від одного ТО до іншого згідно даного ТП.

Для визначення напрямку зв'язку між вершинами графа існуюче ребро помічається стрілкою і називається не ребром, а *дугою*.

Граф, в якому вершини з'єднані дугами (орієнтованими ребрами) називають – *орієнтованим графом* або *орграфом*.

Якщо в графі є і дуги і ребра, то такий граф називається *змішаним*.

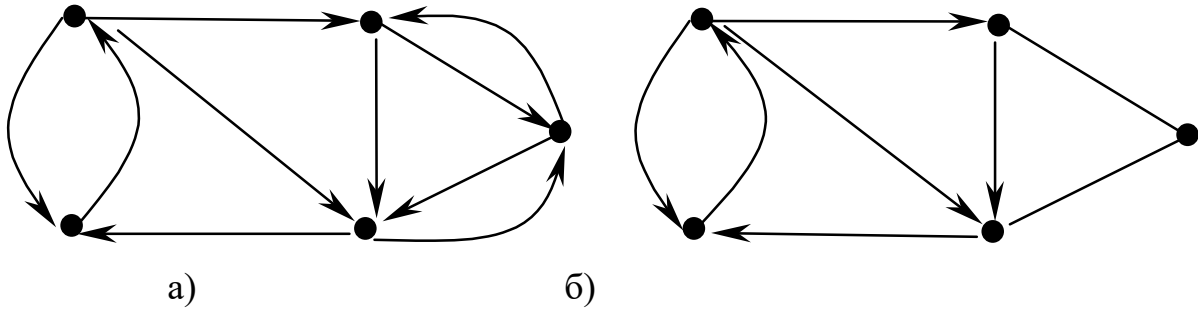


Рис. 2.17. Приклад графу: а – орієнтований; б – змішаний

Якщо замінити напрямки всіх орієнтованих дуг на протилежні отримаємо *обернений* граф відносно вихідного.

Важливими поняттями в орієнтованому графі є поняття шляху та контуру. Позначимо дугу від точки a до точки b як $u=(a, b)$.

Шляхом в графі називають таку послідовність дуг $\mu = (u_1, u_2, \dots, u_k)$, в якій кінець кожної попередньої дуги співпадає з початком наступної. Шлях μ , послідовними вершинами якого є вершини a, b, \dots, t , позначається через $\mu = (a, b, \dots, t)$.

Довжиною шляху $\mu = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ називають число $l(\mu) = k$, яке дорівнює числу дуг, які складають шлях μ .

Інколи кожній дузі u_i приписують певне число $l(u_i)$, яке називається *довжиною дуги*. Тоді довжина шляху визначається як сума довжин дуг, які складають шлях:

$$l(\mu) = \sum_{u_i \in \mu} l(u_i). \quad (2.34)$$

Шлях, в якому жодна з дуг не зустрічається двічі, називається *простим*.

Шлях, в якому жодна з вершин не зустрічається двічі, називається *елементарним*.

Контур – це простий шлях $\mu = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, у якого початкова вершина x_1 співпадає з кінцевою x_k .

При цьому контур називається *елементарним*, якщо всі його вершини різні (окрім початкової та кінцевої, які співпадають).

Контур одиничної довжини, утворений дугою виду (a, a) , називається *петлею*.

Підграфом графа G_A є граф, в який входить лише частина вершин графа G , які утворюють множину A , разом з дугами, які з'єднують ці вершини.

Частковим графом G_Δ графа G є граф, який містить лише частину дуг графа G .

Наприклад, нехай граф – карта шосейних доріг України. Тоді карта шосейних доріг деякої області, наприклад, Київської є підграфом. А карта головних доріг України – частковим графом.

Якщо граф розглядається без врахування напрямку дуг, то він є *неорієнтований*.

Для неорієнтованого графа поняття “дуга”, “шлях” та “контур” замінюються відповідно на поняття “ребро”, “ланцюг” та “цикл”.

Ребро – це відрізок, який з'єднує дві вершини.

Ланцюг – це послідовність ребер.

Цикл – це ланцюг, у якого початкова та кінцеві вершини співпадають.

Граф називається *зв'язним* якщо для будь-якої пари вершин графа можна побудувати ланцюг, що їх з'єднує.

Незв'язний граф складається з окремих зв'язних графів або/та з окремих вершин (ізолювані вершини – не мають зв'язку з жодною іншою вершиною графу), які називаються його компонентами.

На практиці зв'язки між об'єктами часто не рівноцінні і мають певні кількісні або якісні ознаки, властивості або параметри. Тому ребрам або дугам приписуються певні кількісні або якісні значення, які відповідають характеристикам з'єднання і називаються *вагою*.

Порядковий номер ребер або дуг може вказувати на почерговість їх розглядання (ієрархію або пріоритет).

Крім того вага дуги або ребра може позначати:

- довжину (шляху сполучення);
- пропускну здатність (ліній зв'язку);
- напругу або струм (електричні кола);

- кількість набраних балів (турніри);
- валентність зв'язків (хімічні формули);
- кількість рядів руху (автомобільні дороги);
- колір провідника (монтажна схема електронного пристрою);
- характер відношень між людьми (брат, син, батько, вчитель) тощо.

Вагу також можна приписувати не лише ребрам або дугам, а також і вершинам. Тоді це може означати, наприклад:

- кількість населення в населених пунктах на карті шляхів;
- кількість місць в кемпінгах;
- пропускну здатність на станціях техобслуговування тощо.

Тобто вага вершини позначає характеристику відповідного їй об'єкта.

Важливим окремим випадком неорієнтованого графа є дерево.

Дерево називається скінченний зв'язний неорієнтований граф, який не має циклів.

Дерево на множині p вершин завжди буде мати $q = p-1$ ребер, тобто мінімально необхідну кількість ребер для того, щоб граф був зв'язним. При додаванні у дерево хоча б одного ребра утворюється цикл, а при видаленні – граф розбивається на компоненти, кожна з яких є або деревом, або ізольованою вершиною.

Із збільшенням кількості вершин p кількість різних дерев t_p швидко зростає та виражається відношенням:

$$t_p = p^{p-2}. \quad (2.35)$$

Для $p = 4$ можна побудувати 16 графів. Правда більшість із цих графів – ізоморфні, тобто відрізняються лише нумерацією вершин, і лише 2 – не ізоморфні (див. рис. 2.17).

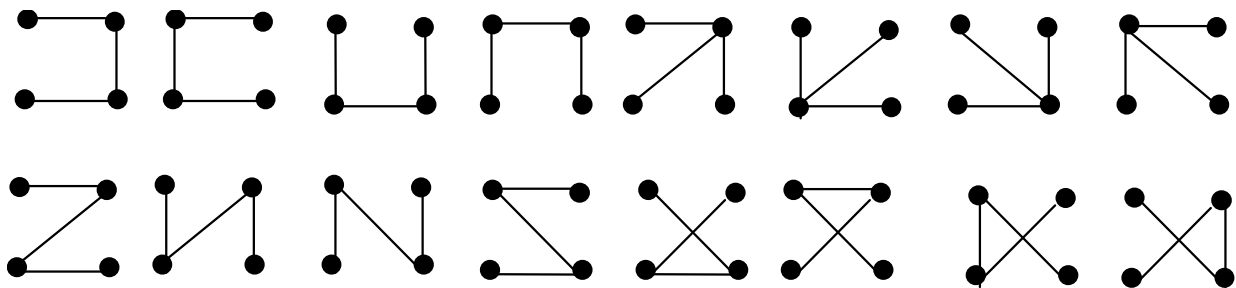
В табл. 2.8. наведені кількість не ізоморфних графів для різної кількості вершин.

Кількість не ізоморфних графів, що можна побудувати на p вершинах

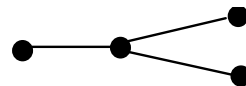
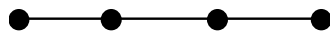
p	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t_p	1	1	2	3	6	11	23	47	106	235	551	1301	3159	7741

p	16	17	18	19	20	21	22	23
t_p	19320	48629	123867	317955	823065	2144505	5623756	14828074

Звичайно, що загальна кількість всіх графів, які можна побудувати на множині вершин, і ще більша.



а)



б)

Рис. 2.17. Дерева на множині чотирьох вершин:

а – ізоморфні; б – не ізоморфні

Лісом називається незв'язний граф, кожний компонент якого є дерево.

Серед різноманітних дерев розрізняють *послідовне* дерево, яке є простим ланцюгом, та *зіркове* дерево, в якому одна з вершин (центр) суміжна із всіма іншими вершинами.

Якщо дерево має орієнтовані ребра – дуги, то воно називається *прадеревом* з коренем v_0 , якщо існує шлях між вершиною v_0 та будь-якою його вершиною. Прадерево має лише один корінь.

Графи широко використовують при системному аналізі різноманітних техніко-економічних ситуацій і проблем. Низка практичних задач потребує зв'язати p пунктів найбільш економічним чином.

Наприклад, необхідно деяку кількість p міст з'єднати дорогами або лініями зв'язку так, щоб їх сумарна довжина була мінімально. Аналогічна задача постає при прокладанні водопроводів, газопроводів, електричних мереж тощо.

Вихідними даними для цієї задачі є множина вершин, які необхідно з'єднати між собою, а також те, що для кожного ребра, що з'єднує будь-яку пару вершин (x_i, x_j) відоме значення його ваги μ_{ij} , яка виражає численну вартість або довжину побудови доріг, прокладання газопроводу, або іншу величину, що характеризує зв'язок між парою вершин.

Необхідно побудувати *екстремальне дерево*, яке буде з'єднувати всі вершини так, що отримана сумарна вага гілок побудованого дерева була мінімальна:

$$\mu_T = \sum_{(x_i, x_j) \in T} \mu_{ij} \cdot \quad (2.36)$$

Вирішувати таку задачу шляхом перебору та порівнянням отриманих результатів навіть при незначній кількості вершин дуже складно через велику кількість розрахунків. Навіть при $p = 9$ кількість можливих дерев буде більше мільйону.

Проте існує досить простий спосіб побудови екстремального дерева:

- спершу обирається та вводиться в дерево ребро з найменшою вагою, яке з'єднує дві відповідні вершини;
- далі на кожному наступному кроці обирається та вводиться до графу ребро з найменшою вагою, яке при з'єднанні з вже наявними ребрами не утворює циклу;
- якщо є кілька ребер однакової довжини, то обирається будь-яке з них;
- побудова закінчується, коли до графу вводиться $(p - 1)$ ребер.

Будь-яке дерево побудоване таким чином є екстремальним.

Звичайно, що побудувати таке екстремальне дерево можна і для неповного графа, коли зв'язок між певними вершинами є забороненим або небажаним.

Також можна побудувати і екстремальне дерево із максимальним сумарним значенням ваги дерева. В такому разі необхідно обирати ребра з максимальною вагою.

Визначення найкоротшого шляху в графі з ребрами довільної довжини

При вирішенні практичних задач важливе місце посідають задачі пошуку найкоротшого шляху з однієї вершини зв'язаного неорієнтованого графа до іншої. До такої задачі зводиться, наприклад, задача пошуку найкоротшого за довжиною, або тривалістю, або вартістю дороги на базі існуючої карти шляхів, або технологічний маршрут при існуючому розміщенні обладнання, або спосіб перевезення із одного стану динамічної системи в інший тощо.

Зрозуміло, що такі задачі можна вирішувати різними методами, проте використання графів є найпростішим способом.

Отже, вихідними даними поставленої задачі є неорієнтований граф та певне число (нуль і більше), присвоєне кожному ребру цього графа і яке характеризує зв'язок між вершинами, які з'єднує дане ребро – вартість, довжину, тривалість тощо.

Необхідно для будь-яких заданих вершин заданого графа знайти такий шлях, щоб його загальна довжина була найменшою.

Розв'язок даної задачі може ускладнюватись тим, що проходження шляху через меншу кількість вершин може мати більшу загальну вагу.

Алгоритм вирішення даної задачі складається з двох етапів:

- індексації вершин;
- безпосереднього знаходження найкоротшого шляху.

Індексація вершин.

– кожна вершина x_i позначається індексом λ_i . Початково кінцевій вершині x_0 приписується індекс $\lambda_i = 0$. Для інших вершин попередньо вважаємо, що $\lambda_i = \infty$ ($i \neq 0$);

– шукаємо таку суміжну вершину x_j , індекс якої $\lambda_j > \lambda_i + l(x_i, x_j)$;

– якщо така вершина знайдена, то замінюємо її індекс на новий $\lambda'_j = \lambda_i + l(x_i, x_j)$;

– якщо таку вершину не знайдено, то переходимо до наступної ще не проіндексованої вершини;

– продовжуємо цей процес доки не буде жодної вершини, для якої не можна зменшити індекс λ_j .

Після проведення індексації вершин виконується безпосереднє знаходження найкоротшого шляху, що з'єднує початкову та кінцеву точки. Для цього:

– починаємо з пошуку початкової вершини x_n з індексом λ_n ;

– шукаємо таку суміжну до знайденої вершину x_{p1} , індекс якої дорівнює $\lambda_{p1} = \lambda_n - l(x_{p1}, x_n)$;

– далі шукаємо суміжну до x_{p1} вершину x_{p2} , індекс якої дорівнює $\lambda_{p2} = \lambda_{p1} - l(x_{p2}, x_{p1})$;

– так продовжуємо поки не дійдемо до кінцевої вершини x_k ;

– шлях $\mu_n (x_n, x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_k)$, довжина якого становить λ_n , і є найкоротшим.

2.5.4. Комплексні методи системного аналізу

До даної групи належать комбінаторика, ситуаційне моделювання, топологія, графосеміотика та ін. Вони сформувалися шляхом інтеграції експертних і формалізованих методів [10].

Комбінаторика займається різного виду з'єднаннями, які можна утворити з елементів кінцевої множини. Комбінаторика (комбінаторний аналіз) – розділ математики, вивчає дискретні об'єкти, множини (поєднання, перестановки, розміщення і перелічення елементів) і

відносини між ними. Комбінаторика пов'язана з багатьма іншими областями математики – алгеброю, геометрією, теорією ймовірності і має широкий спектр застосування в різних областях знань. Іноді під комбінаторикою розуміють більш великий розділ дискретної математики, що включає, зокрема, теорію графів [10].

Ситуаційне моделювання – це один з підходів до моделювання. Крім ситуаційного моделювання також існують імітаційне моделювання, експертне моделювання [10].

Ситуаційне моделювання з чисто технічної точки зору використовується як інструмент моделювання і з'явилося саме завдяки розвитку інформаційних технологій.

Топологія вивчає в узагальненому вигляді явище безперервності, зокрема, властивості простору, які залишаються незмінними при безперервних деформаціях, наприклад, зв'язність, орієнтованість. У топології не розглядаються метричні властивості об'єктів (наприклад, відстань між парою точок). Так, наприклад, з точки зору топології чашка та бублик є подібними за формою. Важливими для топології є типи деформації, що відбуваються без розривів і склеювання [10].

3. СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

3.1. Технології імітаційного моделювання процесів на прикладі системи *Arena*.

Система *Arena* – це проблемно-орієнтоване середовище імітаційного моделювання розроблене компанією Systems Modeling Corporation. *Arena* дозволяє створювати рухомі комп'ютерні моделі для відтворення та вивчення складних систем, їх елементів та взаємозв'язків між ними.

Система імітаційного моделювання *Arena* є досить популярною та використовується такими крупними світовими корпораціями як PWC, Federal Express, Nike та ін. для імітування різних варіантів їх розвитку. Зручність застосування системи *Arena* у наукових дослідженнях є очевидною.

Arena має зручний об'єктно-орієнтований інтерфейс, що інтегрований для роботи з даними, в тому числі електронними таблицями, базами даних, ODBC, підтримує OLE-технологію обміну даними та формат DXF.

Основою технологій *Arena* є мова моделювання SIMAN та анімаційна система Cinema Animation, що використовується для відображення результатів моделювання. Особливістю SIMAN є те, що SIMAN дозволяє досліджувати процеси у різних масштабах часу.

Процес імітаційного моделювання *Arena* досить простий та виконується поступово. Передбачається, що користувач крок за кроком буде у візуальному редакторі системи *Arena* модель складної системи, після чого система *Arena* автоматично генерує по цій моделі відповідний код на SIMAN з послідуочим автоматичним запуском анімаційної системи Cinema Animation.

Імітаційна модель у системі *Arena* являє собою граф (рис. 3.1), вузлами якого є **модулі**. Модулі зв'язані між собою певними з'єднаннями, по яким переміщуються динамічні об'єкти імітаційної моделі, що називаються **транзакти**.

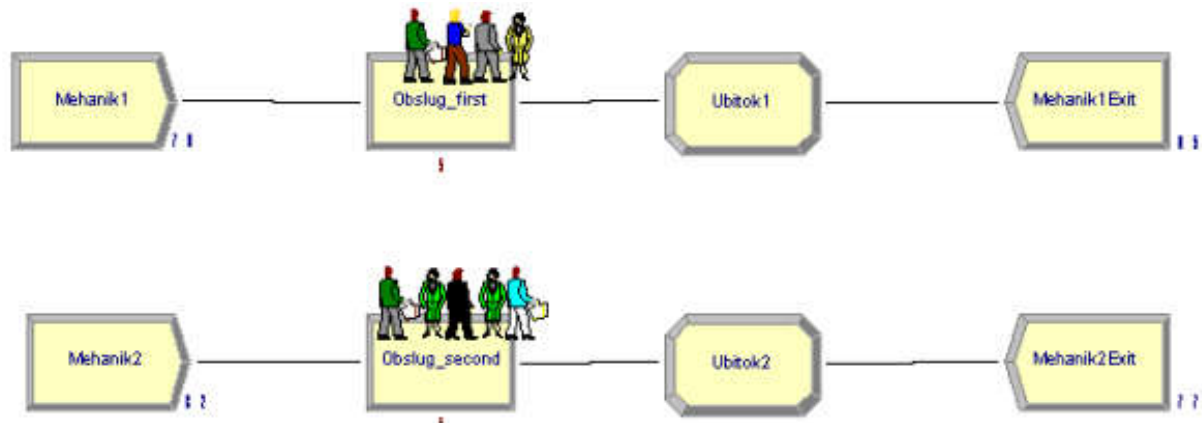




Рис. 3.1. Імітаційна модель у вигляді графа у системі Arena

При побудові моделей у системі Arena використовують наступний понятійний апарат: *транзакт (entity)*, *атрибут*, *змінна*, *ресурс*, *черга (queue)*, *розклад (schedule)*, *блок та модуль*.

 **Транзакт** (в термінах системи Arena – **entity**) – це динамічний (рухомий) об’єкт, що рухається між модулями, які являють собою статичні вузли моделі. Наприклад, об’єкт виробництва, схват ПР, автомобіль, клієнт, документ і тощо.

 Характеристики транзактів (entity) задаються за допомогою **атрибутів**.

Існують системні та власні атрибути.

Системні атрибути – це характеристики транзактів, що встановлюються по замовчуванню. Наприклад, “час фігурування транзакта” (Total Time), “серійний номер транзакта” (Serial Number), тип транзакту (Entity Type), “картинка” (Entity Picture), що візуалізує транзакт.

Власні атрибути – це характеристики транзактів, що привласнюються користувачем, наприклад, “вага деталі”, “число деталей виготовлених за зміну”, “довжина пакета даних”, тощо.

В подальшому атрибути визначають час обробки транзакту, його пріоритетність при обробці та подальший шлях. Вони дозволяють збирати

статистику щодо часу (скільки часу транзакт пробув в моделі, скільки оброблявся, скільки чекав і т.д.) та вартості транзакту (наприклад, оцінювати собівартість об'єкту виробництва після реалізації ТП).



Змінна (в термінах системи Arena – **Variable**) – це глобальна змінна моделі.

Є принципова різниця між змінною та атрибутом транзакту. Так значення змінної є одним для всієї моделі. У той же час для кожного транзакту може бути задане власне значення атрибуту. Наприклад, кількість деталей виготовлених за зміну – це змінна, глобальне ціле, а ось кількість технологічних операцій виконаних на одному робочому місці при виготовленні деталей – атрибут, тому, що на кожному робочому місці виконується своя кількість технологічних операцій у відповідності до технології обробки.

Під час моделювання значення змінної зчитується та змінюється. У залежності від значення, що приймає змінна залежить, наприклад, можливість проходження об'єктами виробництва (деталлями) певної виробничої ділянки на якій відбувається їх обробка, якщо визначено величину або значення відповідної глобальної змінної, яка вказує про отримання / неотримання дозволу на виконання операцій обробки деталей.

Змінні можуть приймати значення одномірних і двомірних масивів. Звернення до елементів масиву здійснюється аналогічно до традиційних мов програмування $A(i, j)$, де i – кількість рядків **Rows**, j – кількість стовпців **Columns**.



Ресурси поділяються між транзактами, а транзакти конкурують за ресурси.

При моделюванні транзакт захоплює вільний ресурс, якщо ресурс зайнятий – очікує поки та використовує його переміщуючись по моделі, після чого відпускає ресурс. Важливою характеристикою ресурсу є **потужність** – кількість одиниць ресурсу. Наприклад, кількість

комп'ютерів у мережі, кількість однакових моделей ПР у гнучкій виробничій системі.

Arena дозволяє задавати характеристики вартості ресурсу – наприклад, яка вартість однієї години одиниці ресурсу коли він вільний / зайнятий, яка вартість одного звернення до ресурсу і т.д.



Черга (queue) – утворюється біля тих модулів, які заважають транзакту пройти далі. Наприклад, токарний верстат зайнятий, і деталь очікує в черзі, поки він звільниться.

Черги створюються автоматично, але розробник моделі має можливість управляти такими типами черг, як FIFO – «First in first out» («Перший прийшов – першим вийшов»), LIFO – «Last in first out» («Останнім прийшов – першим вийшов»), Lowest Attribute Value (Черга за найменшим значенням атрибута), Highest Attribute Value (Черга за найбільшими значеннями атрибута).

Тип черги FIFO – «First in first out» («Перший прийшов – першим вийшов») є найбільш поширеним випадком, що використовується по замовчуванню;

Тип черги LIFO – «Last in first out» («Останнім прийшов – першим вийшов») використовується, наприклад, при моделюванні виробничих систем, зокрема роботи обладнання на виробничих ділянках: партії заготовок в очікуванні їх обробки на технологічному обладнанні знаходяться у між операційних накопичувачах. При звільненні верстату заготовка достається, оброблюється і передається далі. Накопичувач влаштований таким чином, що заготовки, що надійшли пізніше розміщуються перед заготовками, що надійшли раніше і закривають їм вихід із накопичувача. Таку чергу називають «стек».

Тип черг Lowest Attribute Value (За найменшим значенням атрибута) та Highest Attribute Value (За найбільшими значеннями атрибута) дозволяють реалізувати чергу з пріоритетом. Для цього заводять штучний атрибут, який вказує пріоритет кожного типу транзакту. Наприклад, для машини

значення атрибута становить «1», а для звичайних автомобілів значення атрибута становитиме «0». Тоді якщо в черзі звичайні автомобілі, то машину швидкої допомоги будуть попускати вперед і вона займе місце на початку черги. Якщо ж прибуде ще одна машина швидкої допомоги, то вона займе місце після першої машини швидкої допомоги перед звичайними автомобілями.

Порядок дій при створення імітаційної моделі у системі Arena

При створенні моделі у системі Arena необхідно виконати наступні дії:

- 1) визначити транзакти, ресурси та інші об'єкти;
- 2) вибрати необхідні модулі;
- 3) зв'язати модулі між собою;
- 4) для кожного модуля визначити та задати параметри;
- 5) задати характеристики моделі у цілому.

Для запуску системи Arena необхідно виконати наступну послідовність дій **Пуск** → **Arena** (рис. 3.2) після чого відкривається вікно середовища імітаційного моделювання Arena (рис. 3.3) та автоматично створюється новий файл.

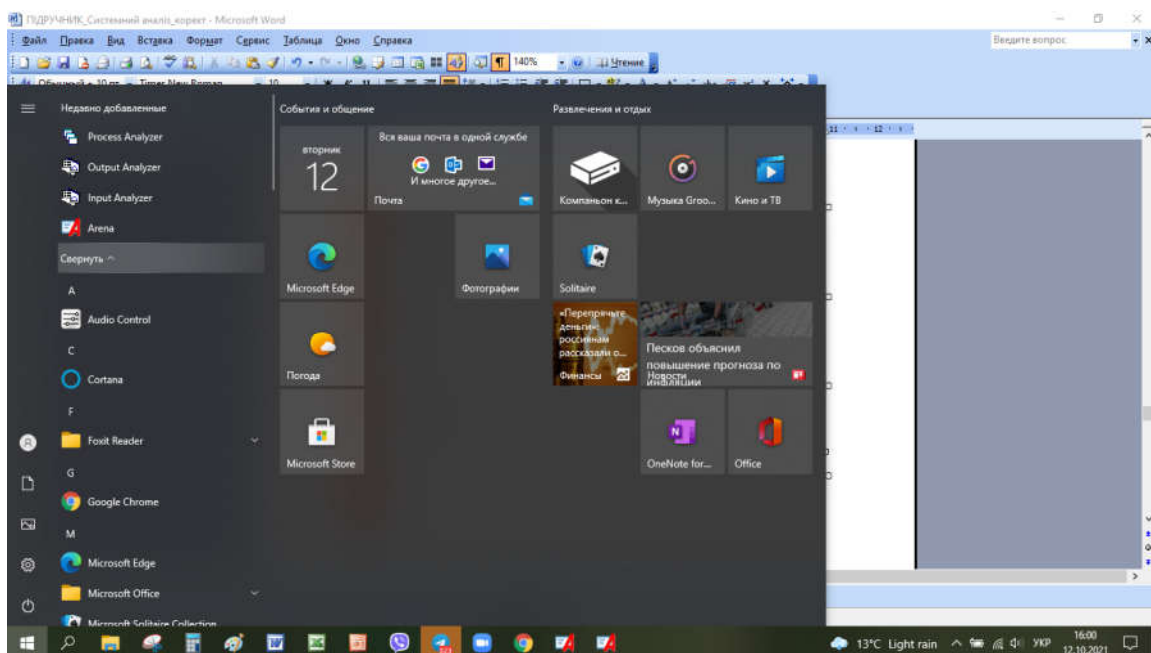


Рис. 3.2. Запуск системи Arena за послідовністю дій Пуск → Arena

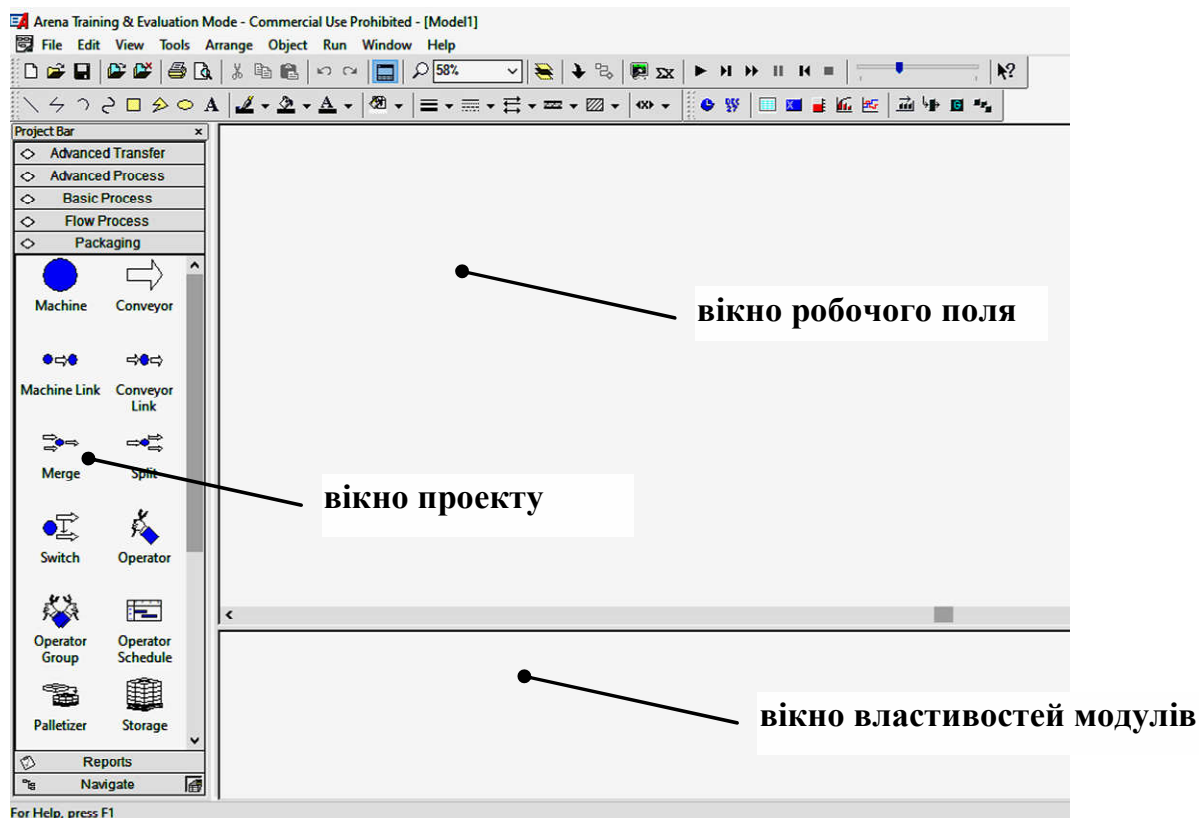


Рис. 3.3. Вікно середовища імітаційного моделювання Arena

Вікно середовища імітаційного моделювання Arena розділене на три області – **вікно робочого поля** в якому відображається графічне зображення моделі, в тому числі блок-схема процесу, анімація та інші елементи; **вікно властивостей модулів**, що служать для налаштування таких параметрів моделі як час, витрати та ін. параметри; **вікно проекту** (рис. 3.3).

Вікно проекту містить декілька панелей (рис. 3.4). **Basic Process** (панель основних процесів) – містить основні модулі, які використовуються для моделювання. **Reports** (панель звітів) – панель повідомлень. Містить повідомлення, які відображають результати імітаційного моделювання. **Navigate** (панель навігації) – панель управління дозволяє відображати всі види моделі, включаючи управління через ієрархічні підмоделі.

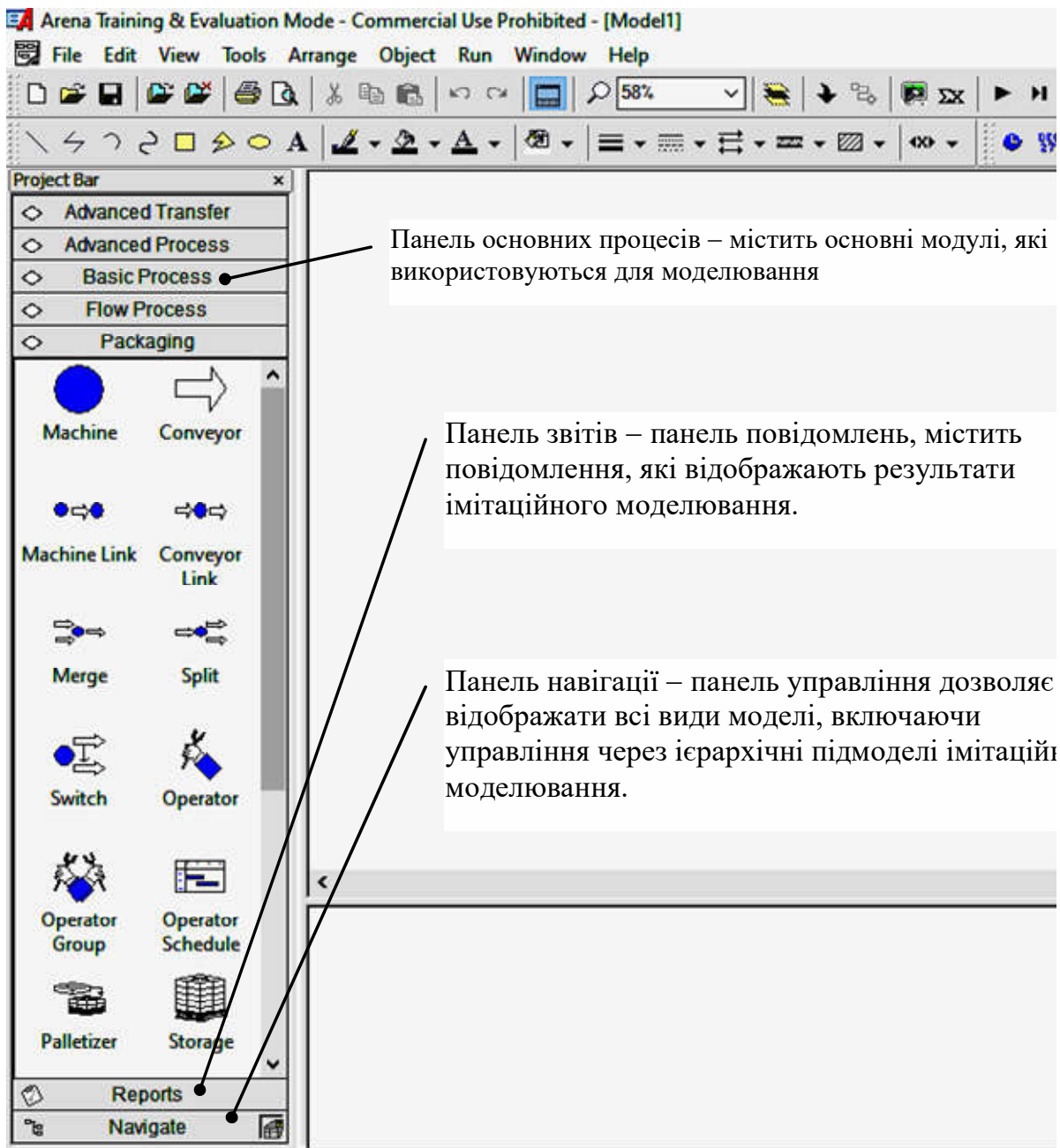


Рис. 3.4. Вікно проекту

Панель Basic Process – панель основних процесів

Дана панель містить основні модулі, які використовуються для моделювання (рис. 3.5).

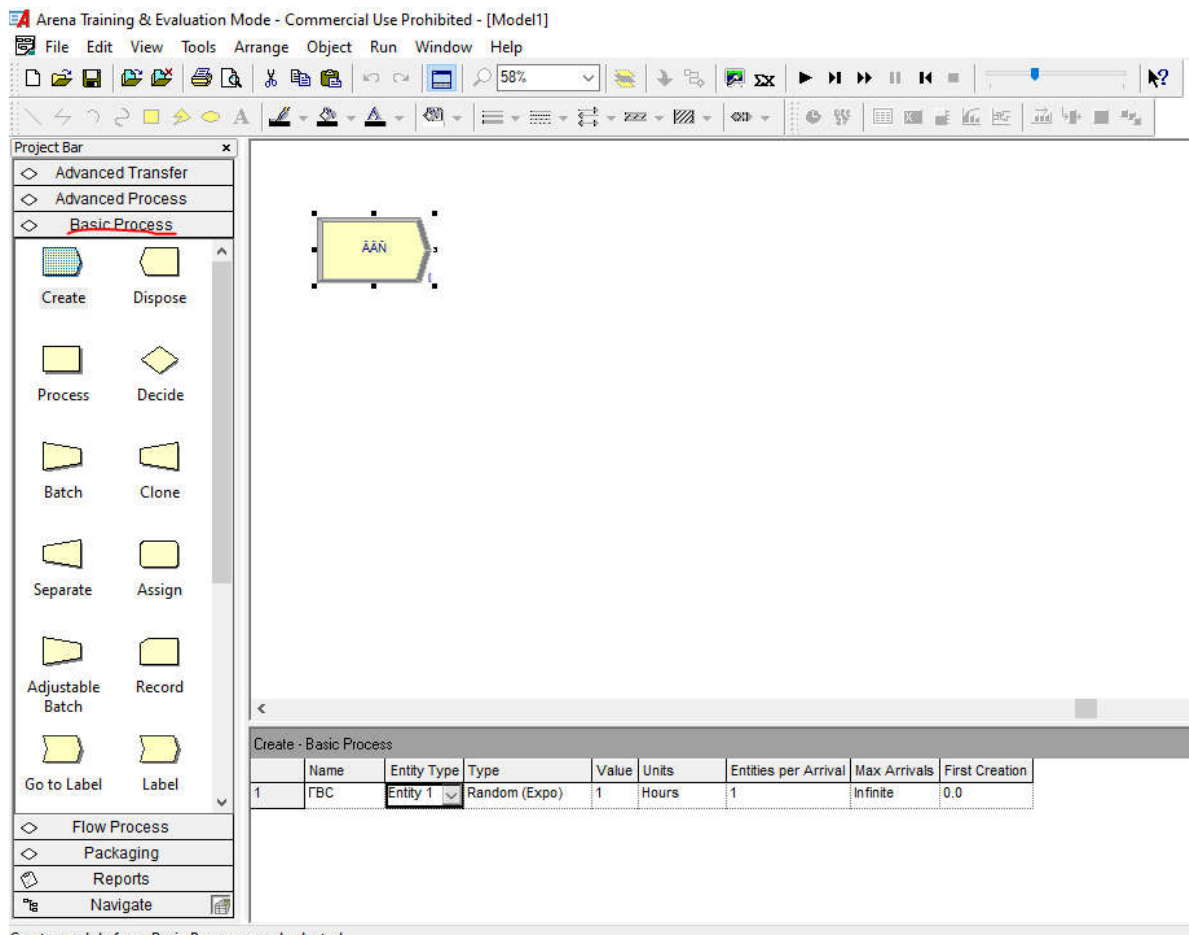


Рис. 3.5. Вікно панелі **Basic Process**

Опис деяких основних модулів панелі **Basic Process**

Модуль **Create**



У модулі визначається тип об'єкта, що надходять в систему. Поява об'єктів визначається розкладом (Schedule) або заданим інтервалом часу (Random Expression Constant).

Наприклад, початок технологічного процесу.

Параметри модуля

Name	Entity Type	Type	Value	Units	Entities per Arrival	Max Arrivals	First Creation	
1	Create 1	Entity 1	Random (Expo)	1	Hours	1	Infinite	0.0

Name – унікальне ім'я модуля, що відобразиться у блок-схемі;

Entity Type – назва типу об'єкта, що буде створюватися модулем;

Type – спосіб формування потоку прибуття. Type може мати значення *Random* (використовується експоненціальне розподіл із середнім значенням, визначеним користувачем), *Schedule* (визначається

модулем *Schedule*), *Constant* (буде використовуватися, задане користувачем, постійне значення; наприклад, 25) або *Expression* (потік прибуття буде формуватися за певним виразом);

Value – визначає середнє значення експоненціального розподілу (якщо *Type* = *Random*) або постійне значення часу між прибуттям об'єктів (якщо *Type* = *Constant*);

Schedule Name – ім'я розкладу, яке визначає характер прибуття об'єктів в систему;

Expression – параметр, що задає тип розподілу або вираз, що визначає час між прибуттям об'єктів в модель;

Units – одиниці виміру часу між прибуттям (день, година, хвилина, секунда);

Entities per arrival – кількість об'єктів, що входять в систему за одне прибуття;

Max arrivals – максимальна кількість об'єктів, яке може створити цей модуль;

First Creation – час, через який прибуде перший об'єкт в модель від початку моделювання.

Модуль Process



Призначений для обробки об'єкта в моделі. Дозволяє задати параметри захоплення об'єкта, постановки його в чергу, часу обробки та ін. Додатково є опції для використання вкладених ієрархічних моделей. Крім того, в цьому модулі визначається ресурс (людина, обладнання та ін.), що здійснює обробку об'єкта.

Наприклад, механічна обробка заготовки.

Параметри модуля

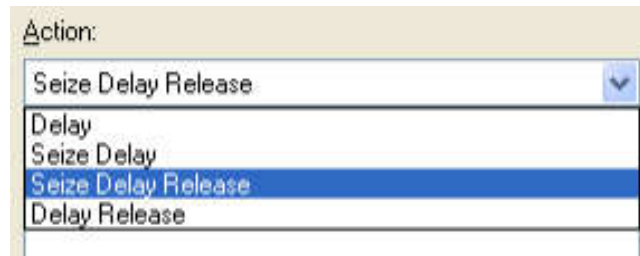
Process - Basic Process										
	Name	Type	Action	Delay Type	Units	Allocation	Minimum	Value	Maximum	Report St
1 ▶	Process 1	Standard	Delay	Triangular	Hours	Value Added	.5	1	1.5	<input checked="" type="checkbox"/>

Name – ім'я модуля, яке буде відображено у блок схемі;

Type – визначає логічну схему модуля. Може приймати значення *Standard*

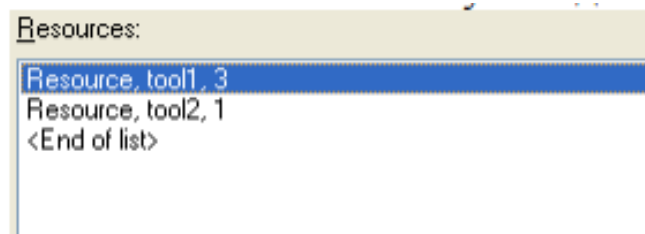
– логічна схема знаходиться всередині модуля і залежить від параметра *Action*; *Submodel* – показує, що логічна схема буде перебувати нижче в ієрархічній моделі. Підпорядкована модель може містити будь-яку кількість логічних модулів;

Action – тип обробки, що відбувається всередині модуля.



Може приймати значення *Delay* (затримати) – показує, що процес займає якийсь час і не вимагає використання ресурсів, наприклад, пофарбована деталь сушиться на відкритому повітрі. Деталі не конкурують, адже одночасно на повітрі може сохнути необмежена кількість деталей; якщо обрано тип *Delay*, то більше нічого вказувати не потрібно, ніякі ресурси для операції не потрібні.

Якщо ж обраний будь який інший тип (*Seize Delay* – захопити – затримати; *Seize Delay Release* – захопити-затримати-відпустити; *Delay Release* – затримати-відпустити (опис див. нижче)), то потрібно вказати, які саме ресурси і в яких кількостях потрібні для виконання операції. Тут показано, що для виконання операції потрібні три штуки *Resources* першого інструменту *tool1* і одна штука *Resources* другого інструменту *tool2*

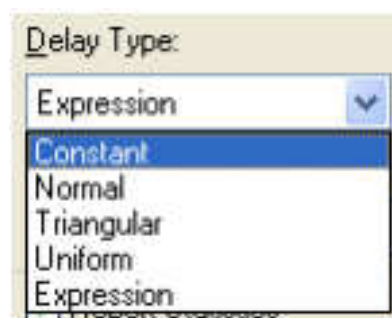


Seize Delay (захопити - затримати) – вказує на те, що в цьому модулі були розміщені ресурси і буде відбуватися затримка, ресурси будуть

захоплюватися (тобто будуть зайняті обробкою об'єкта), і їх звільнення буде відбуватися пізніше; *Seize Delay Release* (захопити-затримати-відпустити) – вказує на те, що ресурс (-и) були захоплені, а потім через деякий час звільнилися. Наприклад, деталь поступила на позицію обробки (верстат), була оброблена і звільнила верстат. Даний тип модуля найбільш поширений; *Delay Release* (затримати-відпустити) – означає, що ресурси до цього були захоплені об'єктом, а в такому модулі об'єкт затримується і звільнить ресурс. Всі ці параметри доступні лише тоді, коли *Type = Standard*.

Типи модулів *Seize-Delay* (захопити – затримати) та *Delay-Release* (затримати-відпустити) використовуються для побудови складних процесів, які передбачають декілька стадій обробки. Тому, що захопивши ресурс, транзакт може утримувати його декілька операцій. Якщо модуль *Process* передбачає захоплення якогось ресурсу (типи *Seize-Delay-Release* або *Seize-Delay*), то до модулю автоматично додається черга. Якщо необхідний ресурс відсутній (зайнятий іншими транзактами, несправний тощо) транзакт буде очікувати його звільнення.

Delay Type – тип розподілу або процедура, що визначає параметри затримки:



за замовчуванням пропонується трикутний закон розподілу з трьома параметрами – мінімальним, найбільш вірогідним і максимальним часом виконання операції. Крім того, можливі наступні типи:

Constant – фіксований час, при якому операція завжди займає чітко заданий час.

Normal – нормальний розподіл часу обслуговування. В цьому випадку необхідно задати два параметри – математичне очікування і середньоквадратичне відхилення;

Uniform – рівномірний розподіл часу обслуговування. Здається мінімальне і максимальне час.

Expression – вираз. Необхідний час обслуговування задається виразом. Наприклад, якщо час обслуговування підпорядковується експоненціальному закону, то можна вказати *expo (15)*. Наприклад, транзакт-вагон може мати атрибут *mass*, що показує вагу вантажу. А час розвантаження може залежати від ваги: $10 * mass$. Щоб включити елемент випадковості задають значення *expo (10 * mass)*.

Units – одиниці виміру часу затримки (день, година, хвилина, секунда);

Allocation – визначає вартісні характеристики обробки: *Value Added* – означає враховувати вартісні характеристики; *Non-Value Added* – не враховувати вартісні характеристики;

Minimum – поле, що приймає мінімальне значення для рівномірного і трикутного розподілу;

Value – поле, що приймає середнє значення для нормального і трикутного розподілу або значення для постійної тимчасової затримки;

Maximum – поле, що приймає максимальне значення для рівномірного і трикутного розподілу.

3.2. Технологія Excel Solver для автоматизації розв'язання типових задач дослідження операцій

Технологія Excel Solver є потужним засобом автоматизації процесу розв'язання задач дослідження операцій та аналізу даних, що реалізована у вигляді надбудови “Пошук рішення” у табличному процесорі Microsoft Excel. При цьому використовуються такі математичні методи як:

– *симплекс-метод* (див. п. 2.5.3.2 даного посібника) – простий і досить швидкий метод, що успішно використовується для розв’язання лінійних задач у яких вихід лінійно залежить від входу;

– метод нелінійної оптимізації, який називають *метод загального понижуючого градієнта (ОПГ)*. Даний метод використовується для розв’язання нелінійних задач у яких вхідні та вихідні данні пов’язані складними нелінійними залежностями;

– *еволюційний пошук рішення* метод оптимізації, що заснований на принципах біологічної еволюції. Даний метод є досить тривалим порівняно із симплекс-методом та методом ОПГ, але дозволяє розв’язувати як лінійні так і нелінійні та дискретні задачі дослідження операцій. Коротко сутність даного методу полягає в наступному:

1) генерується популяція (множина) вихідних рішень з різним ступенем ймовірності їх виживаності;

2) рішення розмножуються перехресним перенесенням, тобто їх компоненти вибираються та комбінуються з декількох існуючих рішень;

3) відбувається мутація існуючих рішень та отримання на підставі цього нових рішень;

4) здійснюється локальний пошук найкращого рішення у популяції для даного моменту часу та генерація нових рішень поблизу найкращого локального рішення;

5) проводиться випадковий відбір рішень, тобто із популяції випадковим чином вибираються неуспішні рішення, що відкидаються.

У цілому застосування методу еволюційного пошуку рішення не дає гарантії знаходження власне оптимального рішення, тому, що він забезпечує пошук кращого рішення у популяції протягом деякого часу лише або до моменту закінчення часу, або зміни популяції у достатній мірі для продовження, або примусової зупинки “Пошуку рішення” натисканням кнопки **ESC** на клавіатурі.

Світова популярність табличного процесора MS Excel забезпечила загальну доступність та широке поширення технології Solver а також зробила надбудову “Пошук рішення” найбільш поширеним

інструментом аналізу даних в задачах дослідження операцій у сфері автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Для роботи з надбудовою “Пошук рішення” її необхідно завантажити в MS Excel та активувати, адже по замовчуванню дана надбудова відключена. Для цього виконують наступну послідовність команд.

1. Для MS Excel 2010 і більш пізніх версій у меню **Файл** вибрати пункт **Параметри**. У вікні, що відкриється вибрати команду **Надбудови** і у полі **Управління** вибрати пункт **Надбудови Excel** та натиснути кнопку **Перейти**.

2. У вікні **Доступні надбудови** включити опцію (встановити прапорець) **Пошук рішення** та натиснути кнопку **ОК**. При цьому, якщо надбудова “Пошук рішення” відсутня у списку поля **Доступні надбудови**, необхідно натиснути кнопку **Огляд**, щоб виконати її пошук. У випадку появи повідомлення про відсутність “Пошуку рішення” на комп'ютері її необхідно установити натиснувши кнопку **Так**.

3. Після виконання вказаних дій команда **Пошук рішення**, що викликає однойменну надбудову, буде доступною у групі **Аналіз** на вкладці **Дані**.

Використання надбудови “Пошук рішення” для розв'язання задач дослідження операцій здійснюється наступним чином.

1. Створюється форма для введення умов задачі, у якій встановлюються зв'язки між комірками. Приклад форми для розв'язку задачі визначення оптимального плану виробництва двох найменувань продукції для максимізації прибутку підприємства, приведений на рис. 3.6 [47].

	A	B	C	D	E
1		товар А	товар Б	Запас	Витрачено
2	ресурс 1	0,5	0,4	120	=B2*B7+C2*C7
3	ресурс 2	1	2	200	=B3*B7+C3*C7
4	ресурс 3	1,7	2	240	=B4*B7+C4*C7
5	ресурс 4	0,05	0,04	70	=B5*B7+C5*C7
6	Ціна	1,15	1,14	Прибуток=тах	=B6*B7+C6*C7
7	План				

Рис. 3.6. Приклад заповненої форми [47]

2. Визначаються та виділяються так звані **змінювані комірки**, тобто комірки таблиці MS Excel, значення яких будуть автоматично змінюватись надбудовою для оптимізації значення цільової комірки. Крім того у так званих змінюваних комірках буде розміщено розв'язок задачі. На рис. 3.6 змінювані комірки **B7:C7** виділені штриховкою [47].

3. Визначається та виділяється так звана **цільова комірka**, тобто комірka в таблиці MS Excel, значення якої оптимізується (значення, що у відповідності до умов задачі є екстремальним, тобто досягає свого максимуму або мінімуму). На рис. 3.6 цільова комірka **E6** виділена темним кольором. Її значення у відповідності до умов задачі максимізується [47].

4. Встановлюються та виділяються **обмеження на змінювані комірki**. Наприклад, згідно із узагальненим формулюванням задачі та її формалізацією (див. формули (2.17) та (2.18) за п. 2.5.3.2 даного посібника) обмеження можуть бути наступними [47]:

- 1) *функціональні* (за формулою (2.17)), що встановлюють обмеження на використання наявних ресурсів у виробничому процесі при виготовленні продукції. Наприклад, для задачі для якої у відповідності до вимог технології Excel Solver розроблено Excel-форму, що наведена за рис. 3.6 функціональні обмеження логічно пов'язують комірki

E1:E5, в які введені формули щодо розрахунку витрат кожного найменування ресурсу, що витрачається при виробництві товарів А та Б, з комірками **D1:D5**, в які введені запаси цих ресурсів. При цьому значення в комірках **E1:E5** не можуть перевищувати значення в комірках **D1:D5** [47];

2) *невід'ємності значень* у змінюваних комірках, тобто відповідно до п. 2.5.3.2 даного посібника, значення, що заносяться у змінювані комірки **B7:C7** (див. рис. 3.6) повинні бути або додатними, або дорівнювати нулю (але не в якому разі невід'ємними) [47].

5. Завантажити у Excel надбудову "Пошук рішення". Для цього у меню **Сервіс** обрати команду **Пошук рішення** [47].

6. В діалоговому вікні **Пошук рішення** однойменної надбудови у поле **Встановити цільову комірку** вставити адресу цільової комірки (див. рис. 3.7).

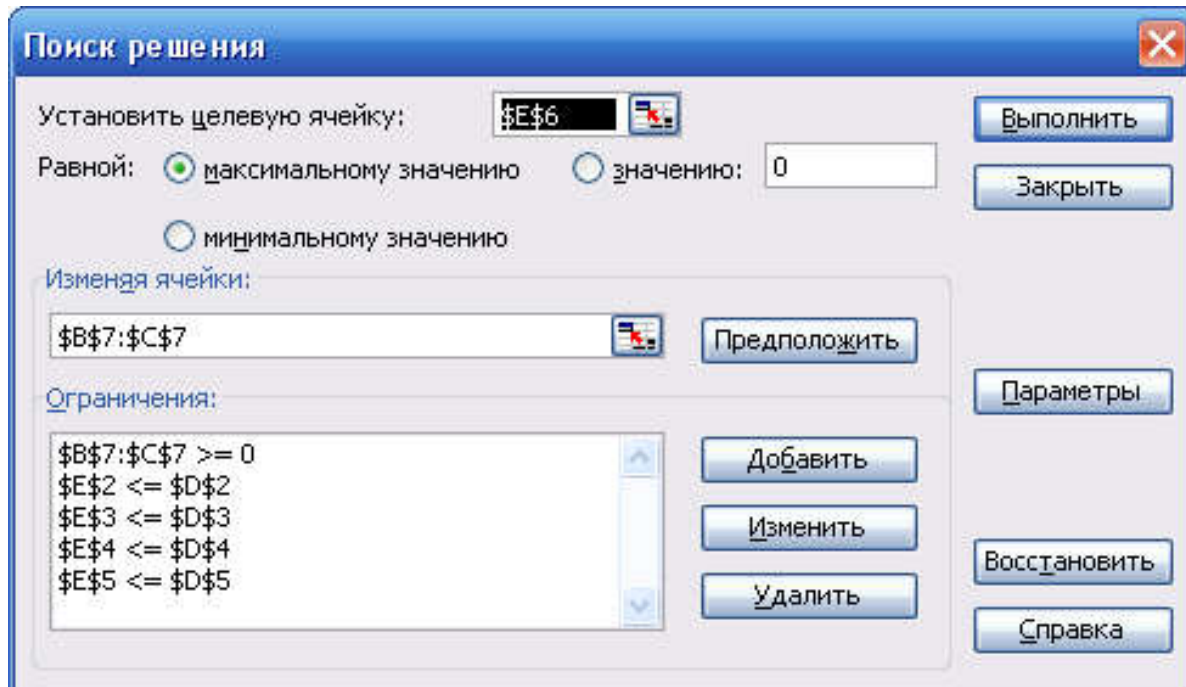


Рис. 3.7. Діалогове вікно надбудови "Пошук рішення" [47]

Наприклад, для Excel-форми на рис. 3.6 в даному полі буде відображено наступне посилання на комірку $\$E\6 . За умовами задачі у Цільовій комірці повинна бути введена формула (1.17) [47].

7. Після вказаного виконуються наступні дії:

- для максимізації значення цільової комірки вибрати із списку команду **максимальному значенню** [47];
- для мінімізації значення цільової комірки вибрати із списку команду **мінімальному значенню** [47];
- для встановити значення цільової комірки рівному числу, необхідно вибрати із списку команду **значенню** і ввести у відповідне поле потрібне число, за винятком нуля [47].

8. У полі **Змінюючи комірки** вставити посилання на змінювані комірки. Посилання розділити комами. У змінюваних комірках, що пов'язані із цільовою коміркою, надбудова **Пошук рішення** при реалізації алгоритму пошуку оптимального значення буде змінювати значення. Для автоматичного знаходження усіх комірок, що мають вплив на формулу моделі задачі, необхідно натиснути кнопку **Припустити** [47].

9. В поле **Обмеження** ввести всі обмеження задачі [47]. Для цього необхідно виконати наступні дії.

- 9.1. У діалоговому вікні **Пошук рішення** однойменної надбудови вибрати розділ **Обмеження** та натиснути кнопку **Добавити**. Після цього випаде діалогове вікно **Добавлення обмежень** (рис. 3.8) [47].

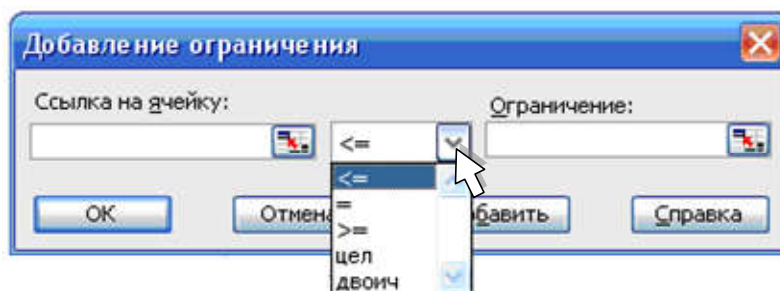


Рис. 3.8. Діалогове вікно "Добавлення обмежень" надбудови "Пошук рішення" [47]

- 9.2. У полі **Посилання на комірку** ввести адресу комірки (вручну або клацнувши мишею на комірку у Excel-формі), на яку необхідно накласти обмеження (рис. 3.8) [47].
- 9.3. Після цього, із переліку позначок команд умовних операторів (\leq , $=$, \geq , **ціл**, **двійк**) (див. рис. 3.8), що розміщений між полями **Посилання на комірку** та **Обмеження** вибрати необхідний умовний оператор. Якщо обрати умовний оператор **ціл**, то у полі **Обмеження** з'явиться напис "ціле". Якщо обрати умовний оператор **двійк**, то у полі **Обмеження** з'явиться напис "двійкове" і т.д. [47]. Варто вказати, що умовні оператори типу **ціл** і **двійк** застосовують виключно у випадку накладання обмежень на змінювані комірки [47].
- 9.4. У поле **Обмеження** ввести число, що відповідає величині обмеження, адресу комірки у якій записано формулу із обмеженням, що накладається на розв'язок задачі або власне формулу (рис. 3.8) [47]. Підтвердити свої дії натиснувши кнопку **ОК** (у випадку закінчення введення обмежень) або кнопку **Додати** (у випадку необхідності продовження процесу введення обмежень) (рис. 3.8) [47].
10. Ввести додаткові параметри. Для цього клацнути кнопку **Параметри**. Після цього у вікні **Параметри пошуку рішення** поставити галочки біля опцій **Невід'ємні значення** (якщо змінні повинні бути додатними числами) та **Лінійна модель** (для задач ЛП), або обрати метод розв'язку задачі (зокрема, симплекс-метод). Підтвердити свої дії, натиснувши кнопку **ОК** (рис. 3.9) [47].
11. 11. Активізувати процес пошуку рішення. Для цього натиснути кнопку **Виконати**. На екрані з'явиться вікно, що вказує про завершення процесу пошуку **оптимального рішення** задачі (рис. 3.10) [47].

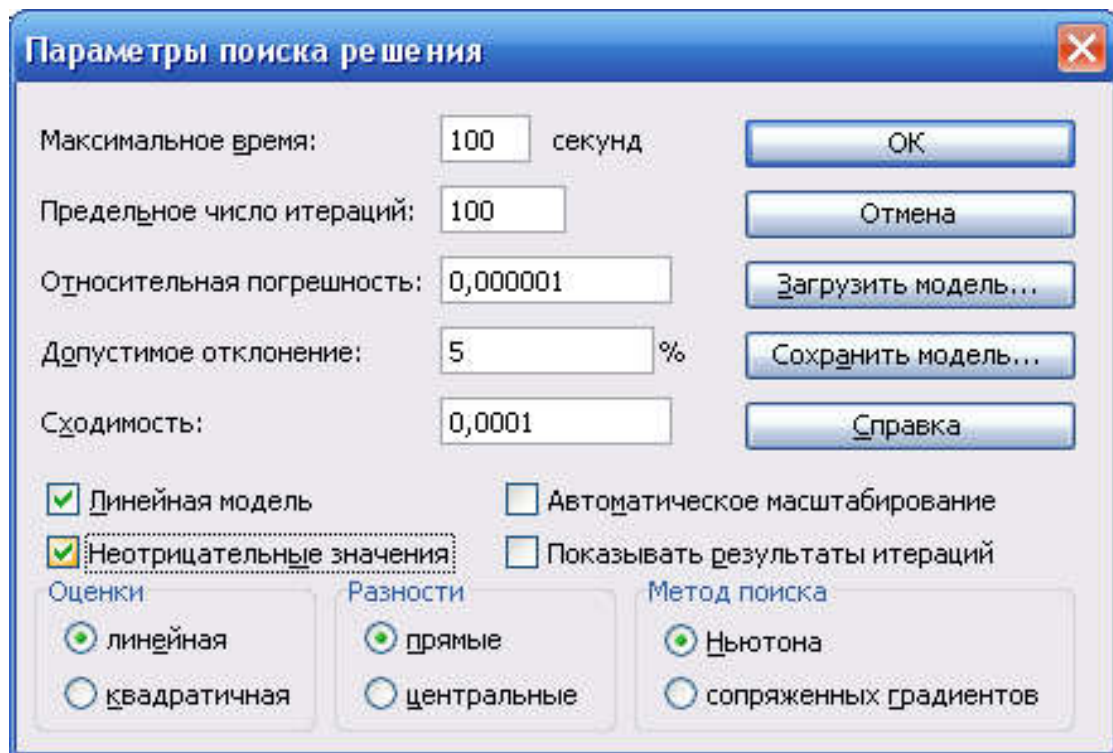


Рис. 3.9. Диалогове вікно "Параметри пошуку рішення" надбудови "Пошук рішення" [47]

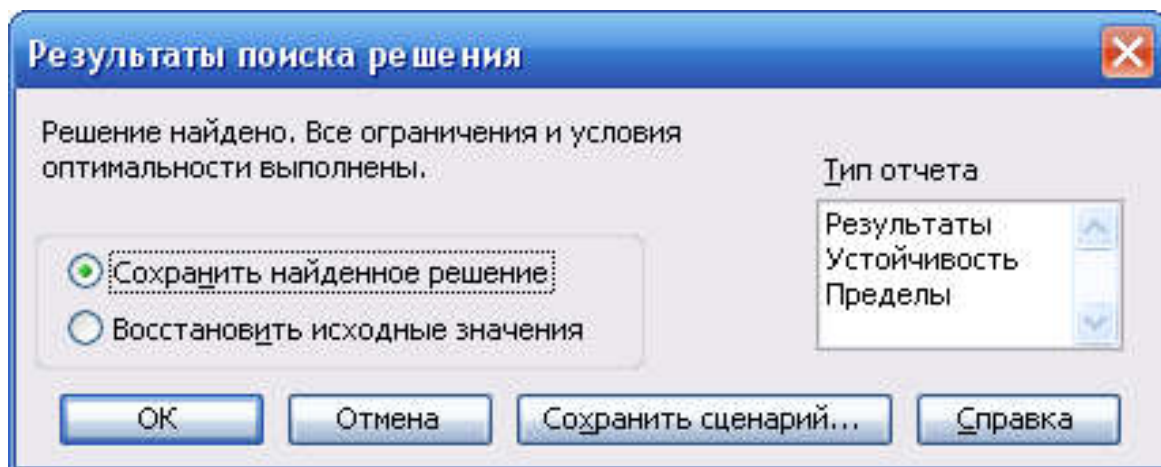


Рис. 3.10. Диалогове вікно "Результати пошуку рішення" надбудови "Пошук рішення" [47]

3.3. Технології м'яких обчислень (Soft Computing)

Термін “м'які обчислення” був введений у 1994 році професором Каліфорнійського університету Берклі Лотфі Заде. Засновник технології м'яких обчислень (Soft Computing (SC)) так визначав їх сутність: “Зміст м'яких обчислень полягає в тому, що на відміну від традиційних, так званих жорстких обчислень, вони націлені на пристосування до всеосяжної неточності реального світу. Керівним принципом м'яких обчислень є: “терпимість до неточності, невизначеності та часткової істинності для досягнення зручності маніпулювання, робастності, зниження собівартості рішень і кращого узгодження з реальністю”. Вихідною моделлю для м'яких обчислень служить людське мислення.” [56].

При цьому Лотфі Заде підкреслював, що м'які обчислення не є окремою методологією. Це об'єднання, консорціум обчислювальних методологій, які колективно забезпечують основи для розуміння, конструювання та розвитку інтелектуальних систем. У цьому об'єднанні головними компонентами SC є нечітка логіка (FL), нейрообчислення (NC), генетичні обчислення / алгоритми (GC) і ймовірні обчислення (PC). Пізніше в цей конгломерат були включені судження на базі свідчень (evidential reasoning), мережі довіри (belief networks), хаотичні системи і розділи теорії машинного навчання [56], фрактальний аналіз, гібридні системи.

У м'яких обчисленнях важливим є те, що складові їх методології є більшою мірою синергетичними і взаємодоповнюючими, ніж конкуруючими. Таким чином, у багатьох випадках більш якісного результату можна досягти шляхом спільного використання FL, NC, GC і PC, ніж шляхом їх окремого застосування. Більше того, існує багато проблем, які не можуть бути вирішені тільки одним засобом: FL, NC, GC або PC [56].

Кожна із складових технології SC має багато можливостей для її використання в рамках м'яких обчислень. FL лежить в основі методів роботи з неточністю, наближеними судженнями. NC відображають здатність до навчання, адаптації та ідентифікації. У разі застосування GC, мова йде про можливість систематизації випадкового пошуку та можливості досягнення оптимального значення характеристик. PC забезпечують базу для управління невизначеністю і проведення суджень, що виходять із свідчень [56].

Системи з комбінаціями технологій FL, NC, GC і PC називають *гібридними системами*.

Таким чином можна говорити, що у інформаційних технологіях під м'якими обчисленнями розуміють методологію використання неточних і математично строго не обґрунтованих методів і алгоритмів для розв'язання таких задач, для яких не існує строгих підходів їх вирішення.

У цілому можна дати наступне визначення м'яким обчисленням.



М'які обчислення – термін, введений Лотфі Заде у 1994 році, який означає сукупність неточних, наближених методів вирішення завдань, які часто не мають строгих математичних рішень. Такі завдання виникають у сфері автоматизації, робастного управління, біології, медицини, гуманітарних наук, менеджменті.

В якості інструментарію технології м'яких обчислень виступають нейротехнології, технології нечіткої логіки, генетичні алгоритми, ймовірнісні обчислення (рис. 3.11). Ці технології добре доповнюють одне одного, і часто використовуються спільно утворюючи так звані гібридні системи.

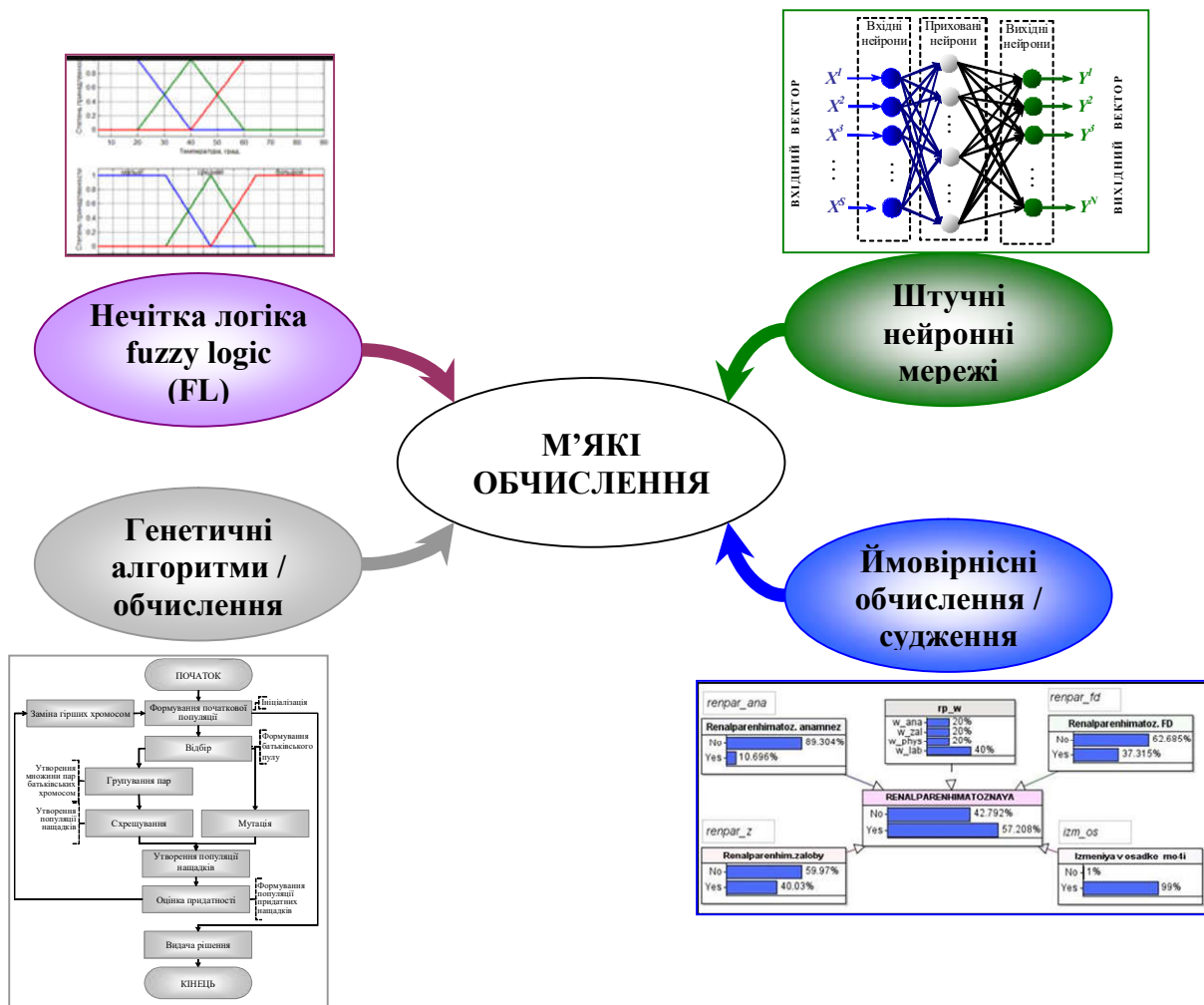


Рис. 3.11. Інструментарій технології м'яких обчислень

Нечітка логіка / fuzzy logic (FL) запропонована у 1965 р. Лотфі Заде в якості математичного апарату для моделювання нечіткості людських суджень [35]. У протилежність до традиційної математики яка оперує при моделюванні з точними і однозначно сформульованими закономірностями, FL пропонує зовсім інший рівень мислення. Так при застосуванні FL формується множина нечітких правил та визначається ступінь істинності. Так, наприклад, FL використовує такі поняття як “приблизно 3”, “швидкість трошки більша 120 км / год”, “нормальне самопочуття”. Очевидно, що такі поняття неможливо формалізувати традиційними математичними методами, при цьому люди повсякчас користуються ними. У FL ступінь істинності може приймати довільні значення з множини чисел від 0 до 1 включно. Завдяки цьому моделювання відбувається на абстрактному рівні.

Інтуїтивна простота FL як методології вирішення складних проблем є основним важелем її значної популярності. На сьогодні Галузі застосування FL є надзвичайно різноманітними. Зокрема FL використовують при розв'язанні задач прогнозування, аналізі та дослідженні даних, керування складними системами. Передовою країною щодо розробки та застосування технологій FL є Японія. В цій країні спеціально створена та успішно функціонує лабораторія Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE), що займається розробкою нечітких систем та приносить мільярди доларів прибутку. LIFE об'єднує 48 компаній, серед яких є такі світові бренди як Hitachi, Mitsubishi, NEC, Sharp, Sony, Honda, Mazda, Toyota.

Нейромережеві технології – це технології створення штучних нейронних мереж (ШНМ / NC) для розв'язання складно формалізованих задач при створенні, функціонуванні та управлінні складними системами (об'єктами, процесами, явищами). Нейромережеві технології – це інформаційно-комп'ютерні технології нового покоління, що охоплюють різноманітні сфери науково-практичної діяльності та є принципово новим підходом до розв'язання складних інтелектуальних задач, що завжди вважалися прерогативою людини. Технологія ШНМ охоплює паралельні, розподілені, адаптивні системи. ШНМ здатні до адаптивного навчання та надшвидкої роботи в режимі реального часу коли обробка інформації здійснюється зі швидкістю розвитку подій у стохастичному та слабо структурованому середовищі. При цьому говорять про таку властивість ШНМ як “живучість”, тобто здатність до повноцінного функціонування навіть при втраті працездатності частини її структури або неповноті та зашумленості інформації з якою працює ШНМ. На сьогодні ШНМ являють собою цілий клас систем, що структура яких подібна до структури біологічних нейронних систем.

Генетичні алгоритми – це евристичні алгоритми пошуку розв'язку оптимізаційних задач (дослідження операцій) зміст яких представлено у п. 2.5.3.2 даного навчального посібника, а також побудови моделей шляхом реалізації процедур випадкового підбору шуканих параметрів та

комбінування різних варіацій із існуючої множини рішень з використанням механізмів, що є аналогічними до механізмів біологічної еволюції. Генетичні алгоритми є різновидом еволюційних алгоритмів, проте у генетичних алгоритмах на відміну від еволюційних основний акцент робиться на використання так званого оператора “схрещування”, який реалізує операцію рекомбінації рішень-кандидатів аналогічно до схрещування генів у живій природі. Задачі, що розв’язуються з використанням генетичних алгоритмів формалізуються таким чином, щоб її розв’язок був представлений (закодований) у вигляді вектора або так званого “генотипу” генів, що представляються у цифровій формі, тобто числами.

Імовірнісні обчислення / алгоритми або **судження** – один із підходів у теорії м’яких обчислень, що орієнтований на роботу з генератором випадкових чисел, та дискретно-рівномірним розподіленням.

Наприклад, відомим є алгоритм HyperLogLog, що реалізує імовірнісний підхід до задачі підрахунку унікальних елементів і базується на двох наступних положеннях:

1) ймовірність P того, що будь-який біт двійкового представлення випадкового числа деякої події дорівнює одиниці, становить 50%;

2) ймовірність того, що спільно відбудуться дві незалежні випадкові події A та B , обчислюється за формулою:

$$P(A) \cdot P(B) = 0,5 \cdot 0,5 = 0,25.$$

Таким чином, якщо, наприклад, ймовірність $P(A)$ того, що один будь-який біт випадкового числа A дорівнює одиниці становить 50%, тоді ймовірність того що два будь-яких біта дорівнюють одиниці, наприклад, A та B становить 25%, три біта – 12,5% і т.д.

Імовірнісні алгоритми (probabilistic algorithm) призначені для розв’язання задач для яких їх точне рішення є неможливим або нераціональним (занадто трудомістким, довготривалим, фінансово затратним тощо).

Фрактальний аналіз. У 1970-х роках французький математик Бенуа Мандельброт відкрив новий погляд на природу і світ в цілому. За основу він узяв дуже просту ідею: нескінченну множину за красою і різноманітністю фігур можна отримати з простих конструкцій за допомогою всього двох операцій – копіювання і масштабування (рис. 3.12).

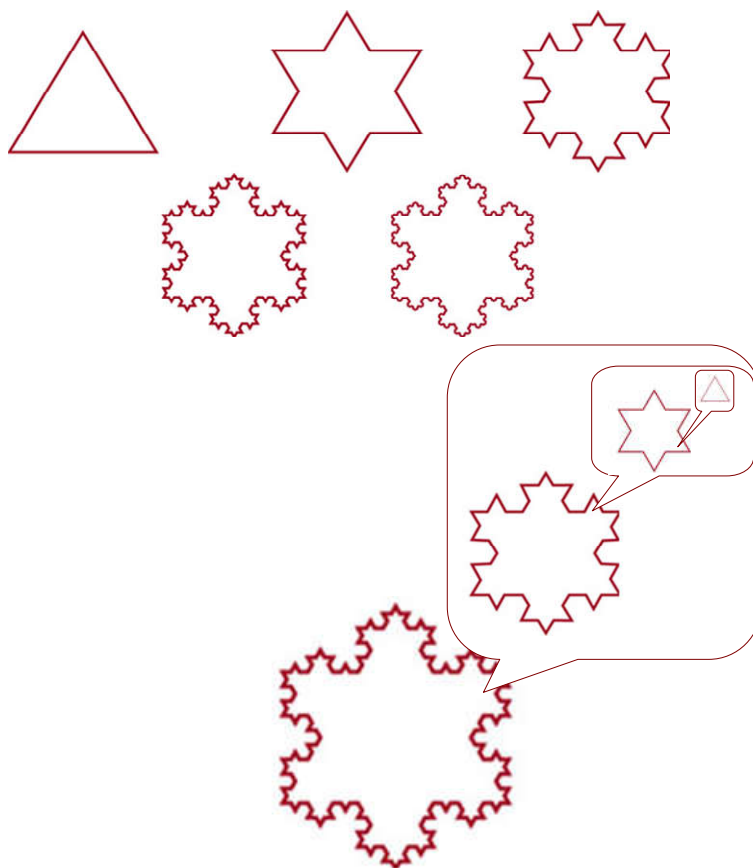


Рис. 3. 12. Приклад геометричного фракталу “Сніжинка Коха”

Таким дивним і повторюваним формам, маленький шматочок яких виглядає в точності, як об'єкт у цілому Б. Мандельброт у 1975 році дав назву – **фрактали** (від лат.: *fractus* (прикметник) – зламаний, розбитий, дробовий і *frangere* (дієслово) – руйнувати, ламати, тобто формувати фрагменти невірної форми) та став засновником нового розділу математики – фрактальної геометрії.

З середини 80-х років минулого століття поняття фракталу увійшло у математику та програмування, а також до термінології дослідників інших

сфер.

Фрактал описується простими правилами, які необхідно багаторазово повторювати. Наприклад, при побудові “сніжинки Коха” необхідно багаторазово повторювати наступні дії:

1. Накреслити рівносторонній трикутник.
2. На кожній стороні трикутника побудувати рівносторонні трикутники.
3. На кожній стороні менших трикутників побудувати трикутники.

На роль виконавця цих дій прекрасно підходить комп'ютер, з появою якого і пов'язують друге народження фракталів.

Таким чином фрактал – структура, що складається з частин, які подібні цілому. Суттєвою його ознакою є те, що він виглядає однаково, в якому б масштабі ми його не спостерігали, а головною властивістю фракталів є їх самоподібність. З математичної точки зору фрактали – це абстрактне поняття, але у природі досить часто зустрічаються об'єкти, що володіють головною властивістю фракталів, наприклад, листя папороті, броколі, дерева, морські зірки, мушлі рапанів, берегові лінії, гірські хребти, сніжинки та ін. (рис. 3.13).

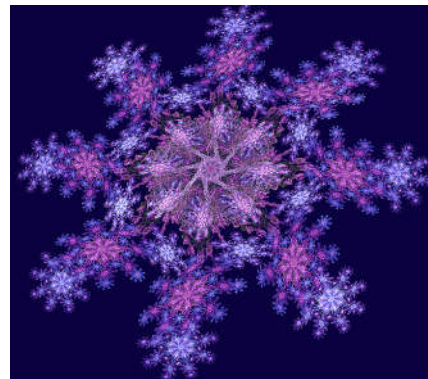


Рис. 3.13. Приклади фракталів у природі

Самоподібність – симетрія при паралельних переносах і зміні масштабу. У найпростішому випадку маленька частина фракталу несе інформацію про весь фрактал. Самоподібність може бути точною та якісною. Точна самоподібність є характерною для в математичних об'єктів (наприклад, крива Коха). Якісна самоподібність, це подібність об'єкту, процесу, явища, що спостерігається у різних масштабах, наприклад, просторових або часових тощо.

Досить поширеним є застосування фрактального аналізу та фракталів в техніці, архітектурі, автоматизації, інформаційно-комп'ютерних технологіях та ін. сферах. Так, наприклад, в телекомунікації фрактали використовуються для створення фрактальних антен. Фрактальні антени – відносно новий клас електричних малих антен (ЕМА), що принципово відрізняється своєю геометрією від відомих рішень. Традиційна еволюція антен базувалася на геометрії Евкліда (лінія, коло, еліпс, параболоїд і т.п.). Фрактальна антена з дивно компактним дизайном забезпечує чудову широкосмугову продуктивність у маленькому формфакторі. Досить компактні для установки або вбудовування в різних місцях, фрактальні антени використовуються для морських, повітряних транспортних засобів, або мобільних телефонів [57].

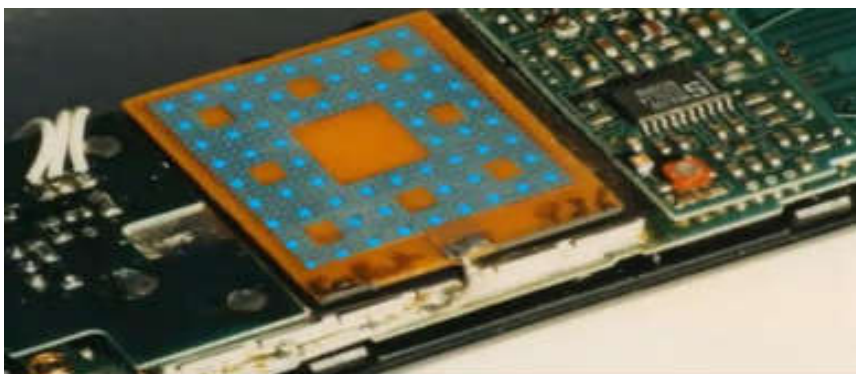


Рис. 3.14. Фрактальна антена на основі “килиму Серпинського” [57]

В інформаційно-комп'ютерних технологіях обробки зображень фрактал із успіхом використовують при їх стисненні. Фрактальний алгоритм має

високий коефіцієнт стиснення, який можна порівняти з методом стиснення JPEG, що значно економить пам'ять комп'ютера.

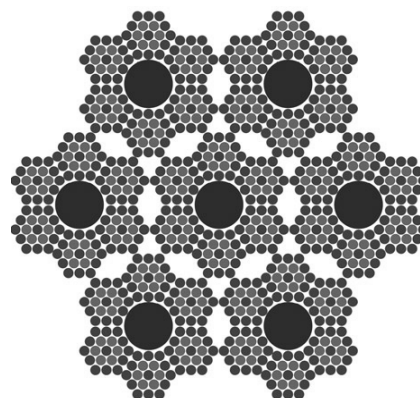
Сутність методу фрактального стиснення зображень полягає у виявленні самоподібних ділянок у зображенні, що дозволяє при наступному збільшенні стисненого зображення зберегти якість зображення.

Яскравим прикладом застосування фракталів у будівництві є висячий міст Золоті ворота через однойменну протоку, що з'єднує місто Сан-Франциско на півночі півострова Сан-Франциско і південну частину округу Марін, поруч з передмістям Сосаліто у США.

Для побудови цього мосту інженери використовували високоміцні кабелі, що були сплетені за фрактальним принципом, тобто із пучків менших проводів, що створені зі більш дрібних пучків проводів (рис. 3.15).



а)



б)

Рис. 3.15. Приклад застосування фракталів у будівництві: а – фрактальний міст Золоті ворота, б – кабель мосту Золоті ворота у розрізі, що сплетений за фрактальним принципом

3.4. Нейротехнології обробки даних

Нейротехнології обробки даних є однією із сучасних та потужних технологій обробки та аналізу даних, що ґрунтуються на застосуванні

таких елементів систем штучного інтелекту (ШІ) як штучні нейронні мережі (ШНМ).

Сучасні ШНМ використовують для вирішення широкого кола задач обробки та аналізу даних. Вони є альтернативою класичним методам аналізу даних, ідентифікації та системам управління.



ШНМ – обчислювальні структури, що моделюють елементарні біологічні процеси, за аналогією до процесів, що відбуваються у біологічних нейронних мережах, що складають мозок людини та її нервову систему.

Сучасні ШНМ є розвитком робіт у галузі штучного інтелекту, що спрямовані на відтворення нервової системи людини (рис. 3.16).

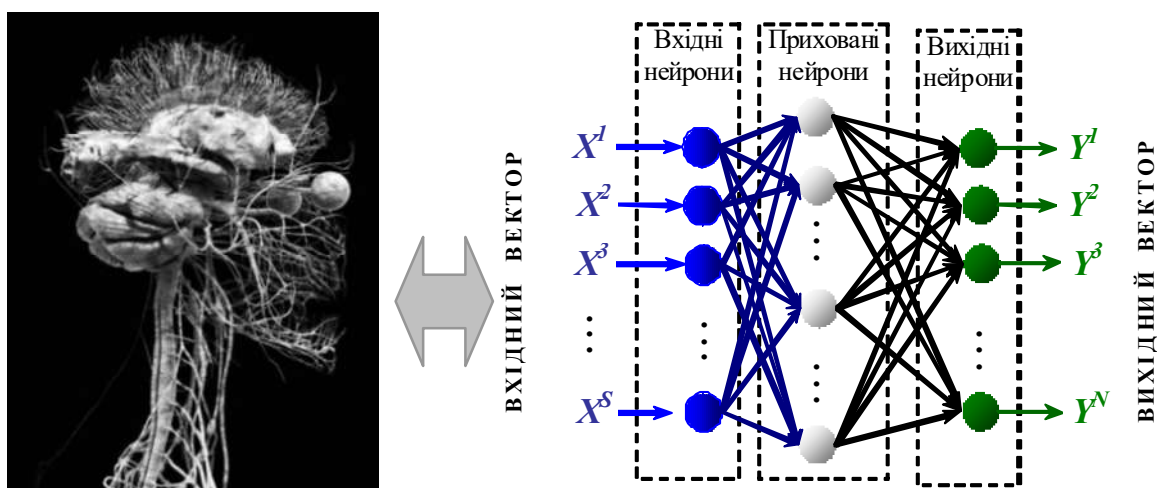


Рис. 3.16

Нервова система і мозок такої біологічної істоти як людина, складаються з множини нервових клітин які дістали назву **нейронів**. Нейрони пов'язані між собою зв'язками, що дістали назву нервових волокон. Нерві волокна здатні передавати електричні імпульси між нейронами (рис. 3.17).

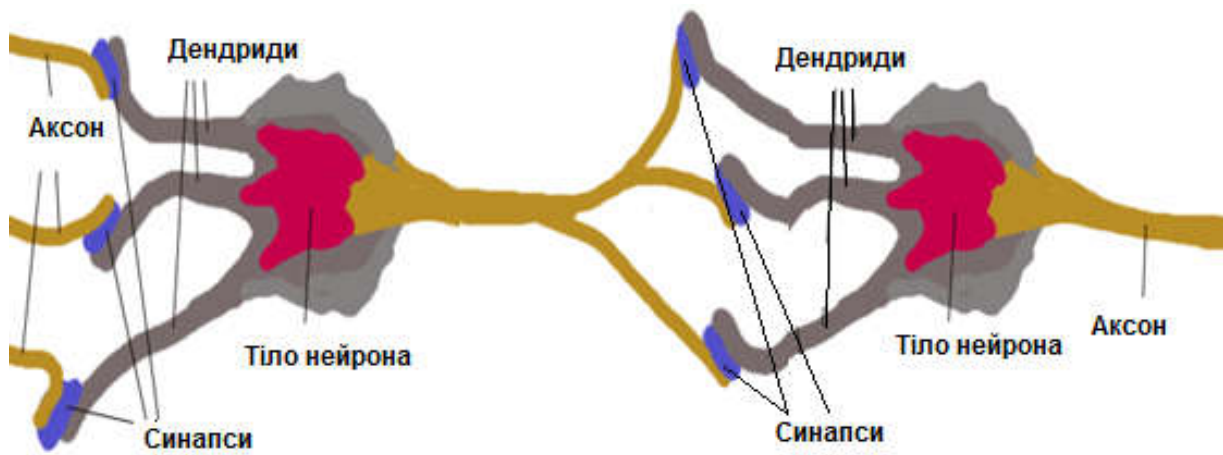


Рис. 3.17

Елементарною частиною ШНМ є так званий штучний нейрон (ШН), що є прототипом біологічного нейрону (рис. 3.18).

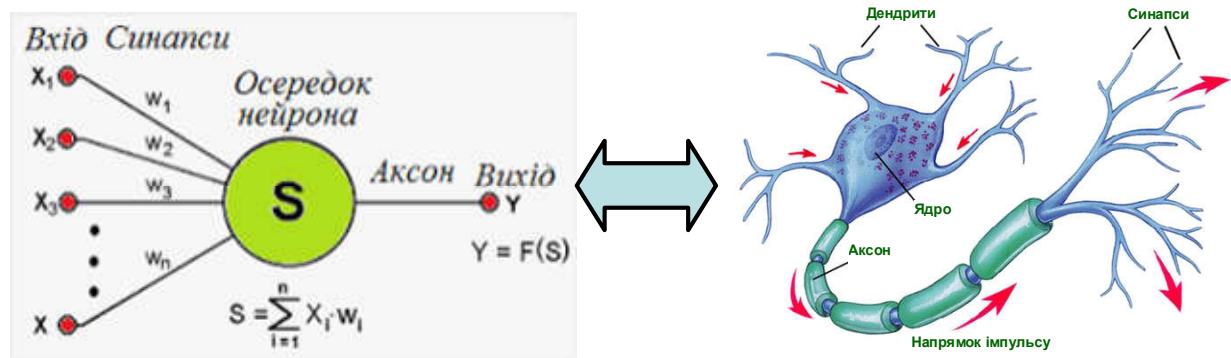


Рис. 3.18

Проте знання людини про роботу мозку надзвичайно обмежені, саме тому розробники ШНМ використовують багато спрощень та припущень і створюють такі структури, що є неможливими у живій матерії. На сьогодні науковці у галузі ШІ відмовились від біологічної правдоподібності при створенні ШНМ, а мозок виступає просто у ролі деякої метафори.

Проте, хоч і з великими припущеннями, все ж таки ШН імітує властивості біологічного нейрону. Зокрема на вхід ШН надходить деяка множина сигналів x_i , кожен з яких є виходом іншого нейрону. Кожний вхідний сигнал множиться на відповідне вагове значення w_i , аналогічно до синаптичної сили біологічного нейрону, отримані добутки додаються, в

наслідок чого ШН досягає певного рівня активації і генеруючи на виході певний інформаційний сигнал *OUT*.

Структурна схема ШН приведена на рис. 3.19. Він складається з наступних елементів:

- **помножувачів**, що на рис. 3.19 позначені символом \otimes . Вони відіграють роль *синапсів* за аналогією з біологічним прототипом ШН та реалізують зв'язок між нейронами шляхом множення вхідного сигналу x_i на синаптичний ваговий коефіцієнт w_i , який характеризує силу зв'язку;
- **суматора**, що позначений символом Σ . У ШН Суматор підсумовує вхідні сигнали;
- **нелінійного перетворювача** позначеного символом F , що реалізує нелінійну **активаційну** (передатну) **функцію** виходу f суматора.

Математична модель ШН описана виразом (3.1).

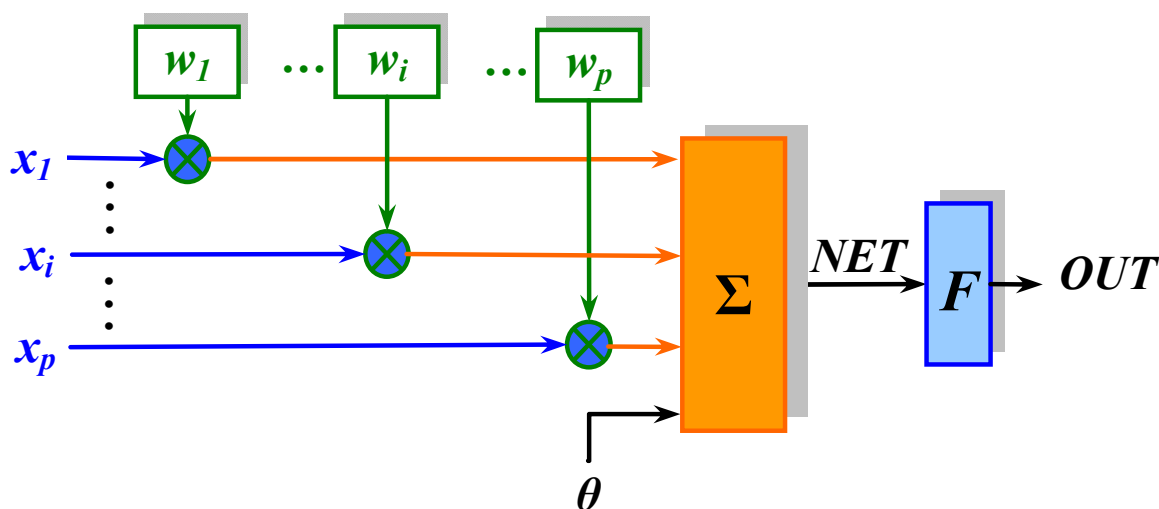


Рис. 3.19. Структурна схема штучного нейрону

$$\begin{cases} NET = \sum_{i=1}^p w_i x_i, \\ OUT = F(NET - \theta), \end{cases} \quad (3.1)$$

де *NET*– зважена сума вхідних сигналів;

w_i – вага синапсу, $i=0, 1, 2, \dots, p$;

x_i – компонента вектору вхідного сигналу, $i=1, 2, \dots, p$;

p – число входів нейрона;

θ – значення зсуву;

OUT – вихідний сигнал нейрона;

F – нелінійний перетворювач, що реалізує функцію активації
 $OUT = f(NET)$.



Функція активації (передатна функція, функція збудження) – функція визначення залежності вихідного сигналу ШН OUT від вихідного сигналу суматора NET .

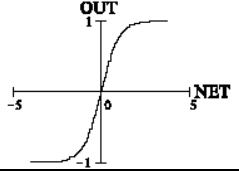
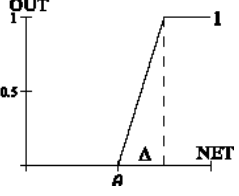
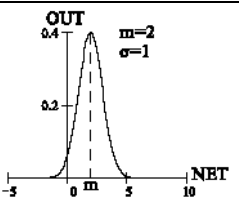
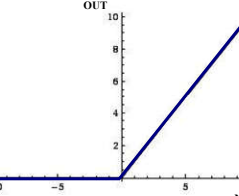
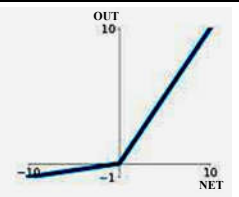
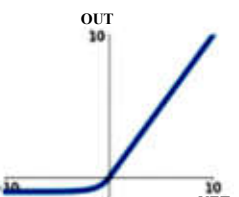
На сьогодні відома множина різноманітних функцій активації. Найбільш популярні, що знайшли своє практичне відображення при синтезі ШНМ представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Основні види функцій активації

Назва функції	Рівняння функції	Область значень функції	Графік функції
Жорсткий поріг	$OUT = \begin{cases} 0, & NET < \theta \\ 1, & NET \geq \theta \end{cases}$	0; 1	
Логістична (сигмоїда, функція Фермі)	$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}$	0; 1	

Закінчення табл. 3.1

Гіперболічний тангенс	$OUT = tg(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}}$	-1; 1	
Пологий поріг	$OUT = \begin{cases} 0, NET \leq \theta \\ \frac{(NET - \theta)}{\Delta}, \theta \leq NET < \theta + \Delta \\ 1, NET \geq \theta + \Delta \end{cases}$	0; 1	
Гаусова крива	$OUT = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(NET-m)^2}{2\sigma^2}}$	0; 1	
Rectified Linear Unit – випрямлені лінійні одиниці (ReLU)	$RELU(x) = \begin{cases} 0 \text{ if } x < 0 \\ x \text{ if } x \geq 0 \end{cases}$	0; x	
Leaky ReLU	$f(x) = \begin{cases} 0.01x, & \text{if } x < 0 \\ x, & \text{otherwise} \end{cases}$	0, 1x; x	
ELU	$\begin{cases} x & x \geq 0 \\ \alpha(e^x - 1) & x < 0 \end{cases}$	—	
Maxout	$\max(w_1^T x + b_1, w_2^T x + b_2)$	—	—

Паралельний зв'язок окремих ШН утворює ШНМ. У ШНМ нейрони пов'язані за принципом “кожний з кожним” коли виходи одних ШН поєднані із входами інших ШНМ. На сьогодні існує множина моделей ШНМ, що відрізняються між собою принципами побудови, передачі сигналів, методами та алгоритмами навчання, вирішуваними задачами. Проте всю множину ШНМ можна розділити на три групи: ШНМ прямого поширення, рекурентні ШНМ та згорткові ШНМ.

ШНМ прямого поширення не мають зворотних зв'язків, що забезпечує стійкість їх роботи і стан їх виходу залежить тільки від сигналів на вході. У цих ШНМ всі сигнали передаються тільки в одному напрямку від входу до виходу. ШНМ прямого поширення навчаються за методом “навчання з вчителем” і знайшли практичне застосування при вирішенні широкого кола таких складних задач як розпізнавання образів, класифікації, аналізу даних. Узагальнено структурну схему ШНМ прямого поширення можна представити на рис. 3.20. До ШНМ прямого поширення належать такі моделі ШНМ як багатошаровий перцептрон (рис. 3.21, а), Мережі Кохонена або самоорганізовані карти Кохонена (SOM) (рис. 3.21, б), RBF-мережі або мережі з радіальними базисними функціями (рис. 3.21, в), Зірка Гроссберга (рис. 3.21, г), двонаправлені мережі або мережі зустрічного розповсюдження (counter propagation) або мережі Кохонена та Гроссберга (рис. 3.21, д), Імовірнісна нейронна мережа ((Probabilistic Neural Networks – PNN) (рис. 3.21, е).

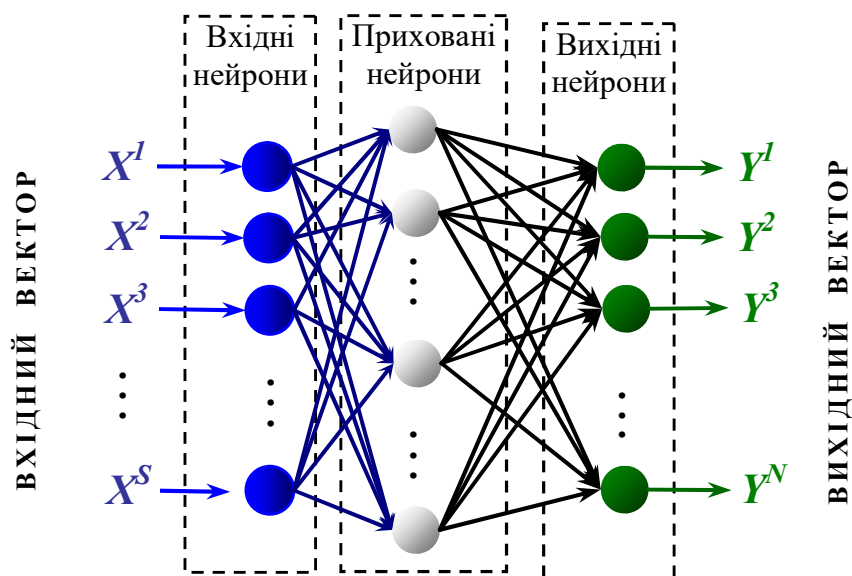


Рис. 3.20. Узагальнена структурна схема ШНМ прямого поширення

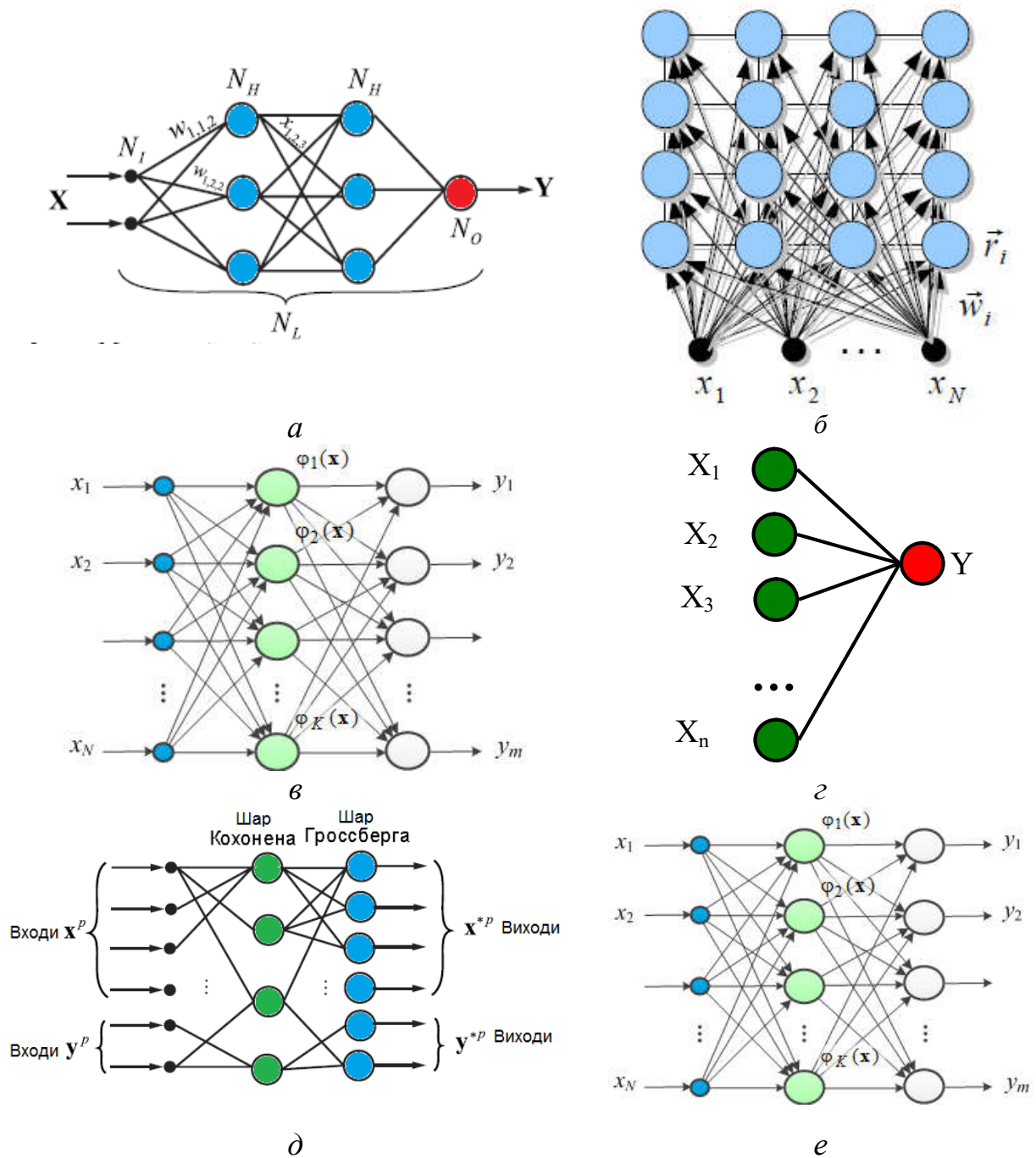


Рис. 3.21. Моделі ШНМ прямого поширення

Мережі зворотного або зустрічного поширення або рекурентні мережі (рис. 3.22).

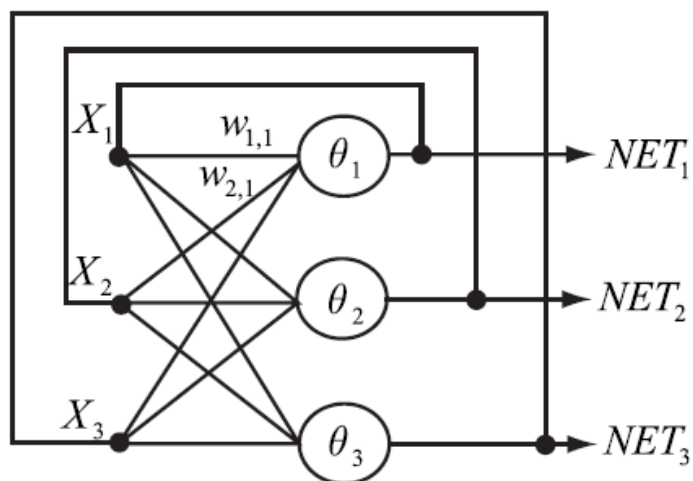


Рис. 3.22. Узагальнена структурна схема рекурентних ШНМ

Відмітною особливістю таких ШНМ є наявність зворотних зв'язків, по яким вихідні сигнали передаються із виходів на вхід внаслідок чого ШНМ постійно змінюють свій стан та є динамічними системами. При чому серед рекурентних ШНМ виділяють такі, для яких з часом вихідні сигнали перестають змінюватись і ШНМ із динамічного стану переходить у стійкий стан. Такі ШНМ прийнято називати *стійкі рекурентні ШНМ*. До стійких рекурентних ШНМ відносять ШНМ Хопфілда (рис. 3.23, а), ШНМ Хеммінга (рис. 3.23, б), ШНМ АРТ (адаптивної резонансної теорії) (рис. 3.24, в), ШНМ Ліппмана-Хеммінга (рис. 2.25, г), Когнітрон (рис. 3.24, д), Неокогнітрон (рис. 3.23, е).

Проте серед рекурентних ШНМ існують такі для яких процес зміни виходу і відповідно входу не припиняється ніколи. Такі ШНМ називають *нестійкими рекурентними ШНМ*. На сьогодні нестійкі ШНМ поки що не знайшли свого практичного застосування, а стійкі рекурентні ШНМ обмежені у використанні і поки що застосовуються для моделювання хаотичних некерованих систем та в якості асоціативної пам'яті. Навчаються такі ШНМ за методом навчання "без вчителя".

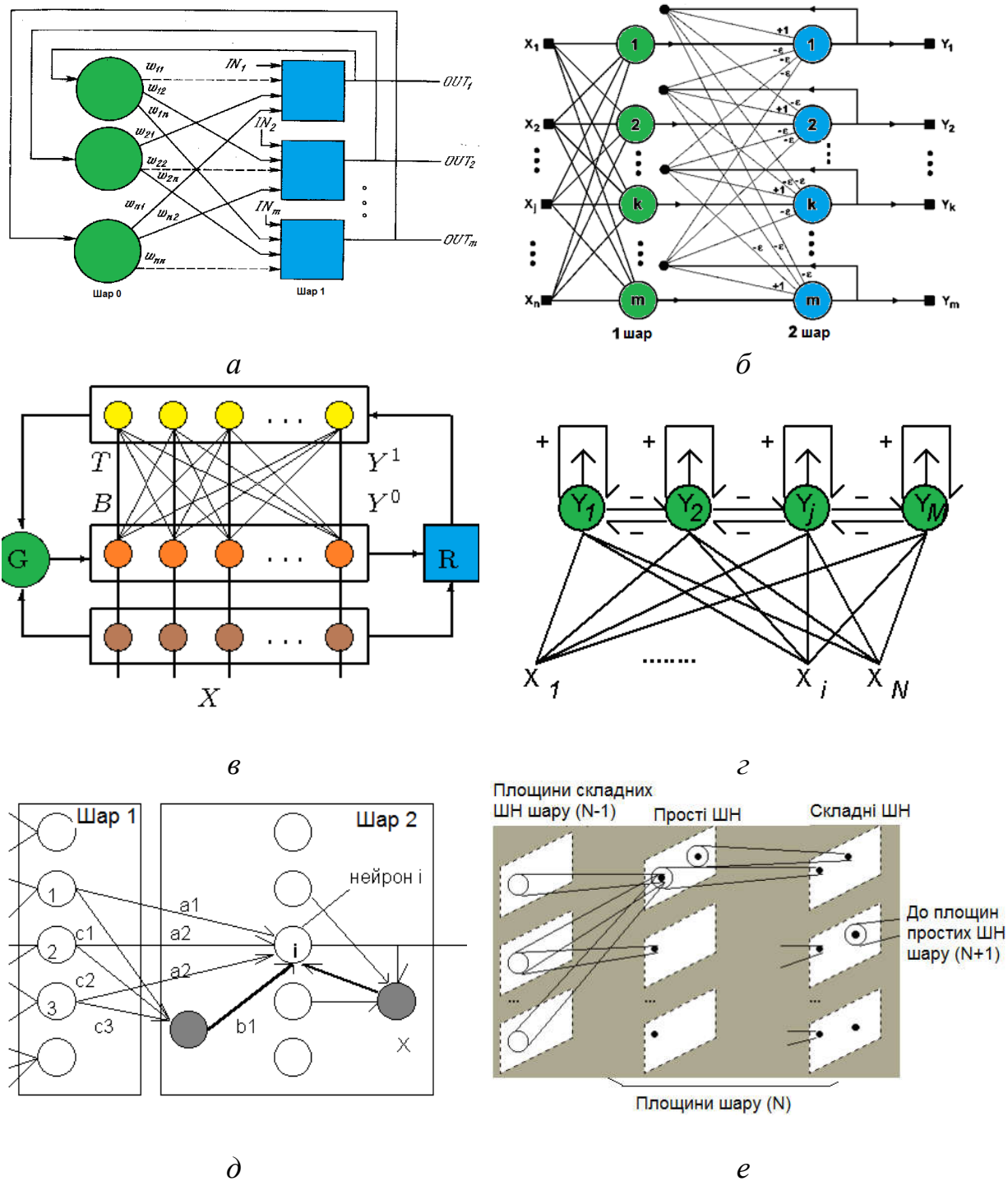


Рис. 3.24. Моделі стійких рекурентних ШНМ

Згорткові ШНМ Convolutional Neural Network або CNN – це ШНМ ШНМ з особливою архітектурою, що були створені для розпізнавання зображень (рис. 3.25).

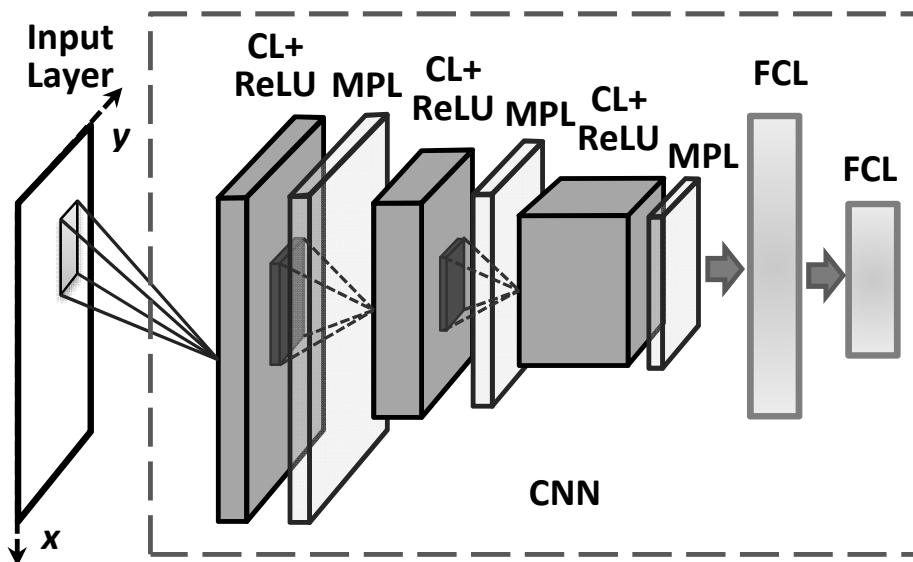


Рис. 3.25. Узагальнена структурна схема згорткових ШНМ

Характерною відмітністю CNN є їх живучість при спотвореннях зображень, наприклад, масштабуванні, зсувах, воротах тощо. Прикладами CNN є ШНМ CaffeNet (AlexNet), R-CNN (Regions With CNNs), Fast R-CNN, Mask R-CNN [59].

Розробка ШНМ передбачає вибір типу стилю (спосіб) з'єднання штучних нейронів між собою. Способів або типів з'єднань штучних нейронів між собою є досить багато. Всі вони є підґрунтям структури або моделі розроблюваної ШНМ. Кожний спосіб з'єднання штучних нейронів між собою у ШНМ має свої властивості та використовується при розв'язанні певних задач. Вибір способу з'єднання штучних нейронів між собою при розробці ШНМ здійснюється виходячи із особливостей та складності задач для розв'язання яких і розроблюється ШНС [59]. З огляду на вказане, необхідно вказати, що сферами застосування ШНМ є такі для яких класичні процедури, методи та алгоритми управління, обробки інформації, прийняття рішення малоефективні або взагалі незастосовувані. Це сфери у яких задачі не піддаються формалізації. При цьому вхідні данні задач є неповними, спотвореними, надлишковими та суперечливими. Як правило, це різноманітні задачі обробки та аналізу даних [35], наприклад, задачі Data Mining, Text Mining, Web Mining, задачі прогнозування

(політичні, соціальні, динаміки рейтингів та ін.), аналізу (результатів опитувань, сейсмічних даних та ін.), асоціативних методів пошуку (рішень, родовищ корисних копалин) та багато інших.



**Приклад
практичного
застосування
штучних нейронних
мереж для
інтелектуального
аналізу даних**

Як вказувалось раніше нейромережеві технології успішно застосовують як для роботи з великими об'ємами даних так і для порівняно малих об'ємів даних, отриманих, наприклад, за результатами окремих дослідів. В якості прикладу розглянемо досвід застосування ШНМ при визначенні складових похибок вимірювання кутів гоніометричним програмно-технічним комплексом за методом їх декомпозиції, що описаний в роботі [60].

У роботі [60] вказано, що одними із показників ефективності функціонування будь яких вимірювальних систем є точність, достовірність та швидкодія вимірювань. При цьому підвищення точності можливе за рахунок удосконалення методів вимірювання, обчислювальних алгоритмів та інших процедур, що дозволяє забезпечити задану точність менш витратними, проте не менш ефективними способами. Забезпечення високої достовірності вимірювань, окрім застосування технічних засобів з високою інструментальною точністю, досягається шляхом додаткового застосування цілого комплексу спеціальних заходів. Зокрема обчислення і нормування складових похибок вимірювання. Як відомо, джерелами виникнення похибок вимірювання всіх вимірювальних засобів і систем є методичні, інструментальні та суб'єктивні похибки, які проявляються в результатах вимірювання у вигляді *систематичних* та *випадкових* складових, зміна яких у часі являє собою нестационарний випадковий процес. Процедури обробки результатів вимірювань, а також нормування

систематичних та випадкових складових похибок вимірювання відомі, мають багаторічну практику застосування, добре обґрунтовані, максимально формалізовані, є принципово різними та регламентуються відповідними нормативними документами. Так *випадкова* складова похибки вимірювання змінюється випадковим чином за знаком та значенням при повторних вимірюванні однієї і тієї ж фізичної величини, проведених з однаковою ретельністю в одних і тих же умовах. Випадкові похибки не можна усунути і неможливо уникнути. Нормування випадкових похибок здійснюють із застосуванням теорії ймовірності та математичної статистики за результатами багаторазових вимірювань. Випадкові похибки, на відміну від систематичних, не можуть бути виключені із результатів вимірювання. Проте величину випадкових похибок суттєво зменшують шляхом збільшення кількості спостережень, яка може бути визначена за відомою методикою. *Систематична* складова похибки вимірювання, на відміну від випадкової, залишається постійною або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж фізичної величини. Систематична похибка може бути передбачувана, винайдена та практично повністю усунена введенням відповідних поправок. Проте, систематична складова похибки за даними, що наводяться в літературі вважається специфічною, “виродженою” випадковою величиною, яка має деякі властивості випадкової величини, що вивчаються теорією ймовірності та математичною статистикою. При цьому процедури нормування та підсумовування систематичних та випадкових складових похибок є принципово різними.

Саме тому у роботі [60] вказано, що при аналізі великих об’ємів вимірювальної інформації важливо визначити яка саме складова похибки вимірювання наявна, ще до початку обробки цих результатів. Адже правильне визначення складових похибок у результатах вимірювання за твердженнями авторів дозволить в подальшому коректно застосовувати відповідні методи обробки вимірювальних даних, уникнути хибностей та неточностей і, як наслідок, підвищити точність та достовірність вимірювань в цілому.

Статті [60] вказано, що традиційно для визначення складових похибок вимірювання використовують аналітично-розрахункові методи, що базуються на застосуванні дисперсійного критерію Фішера та критерію Вілкоксона. При цьому визначення складових похибок вимірювання із застосуванням вказаних аналітично-розрахункових методів є багатоетапним, рутинним та, відповідно, досить трудомістким процесом, що вимагає значних витрат часу.

Авторами статті [60] вказується, що аналітично-розрахункова процедура визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера, який виконується на етапі аналізу результатів вимірювання, передбачає виконання певної кількості кроків і представлена у вигляді чіткого алгоритму. Узагальнена блок-схема алгоритму, що ілюструє роботу цієї аналітично-розрахункової процедури, приведена на рис. 3.26. Його реалізація передбачає виконання 13 кроків та підкреслює значну трудомісткість процесу визначення складових похибки вимірювання.

Для прикладу авторами статті [60] у табл. 6.1 приведено результати аналітичного визначення складових похибки вимірювання за приведеним алгоритмом при визначенні плоского кута 24-гранної призми. Визначення складових похибки вимірювання проводилось на попередньо визначеній множині результатів спостереження (для даного випадку необхідна множина спостережень становить $N = 37$, тривалість вимірювання – 6 годин). Встановлено, що у результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки, що нормується із застосуванням методів математичної статистики та теорії ймовірності відповідно до нормативних документів.

Автори статті [60] доводять, що при застосуванні аналітично-розрахункової процедури визначення складових похибок вимірювання оператору необхідно виконати 223 математичних операції, зокрема 114 операцій додавання, 46 – віднімання, 46 – множення та 17 – ділення, що підтверджує суттєву трудомісткість цієї процедури. Крім того, враховуючи, що при вимірюваннях проводять як правило багаторазові спостереження, кількість N результатів яких може бути досить великою

(табл. 3.2) то очевидним є значне збільшення часу на виконання вимірювань та обробки отриманих результатів.

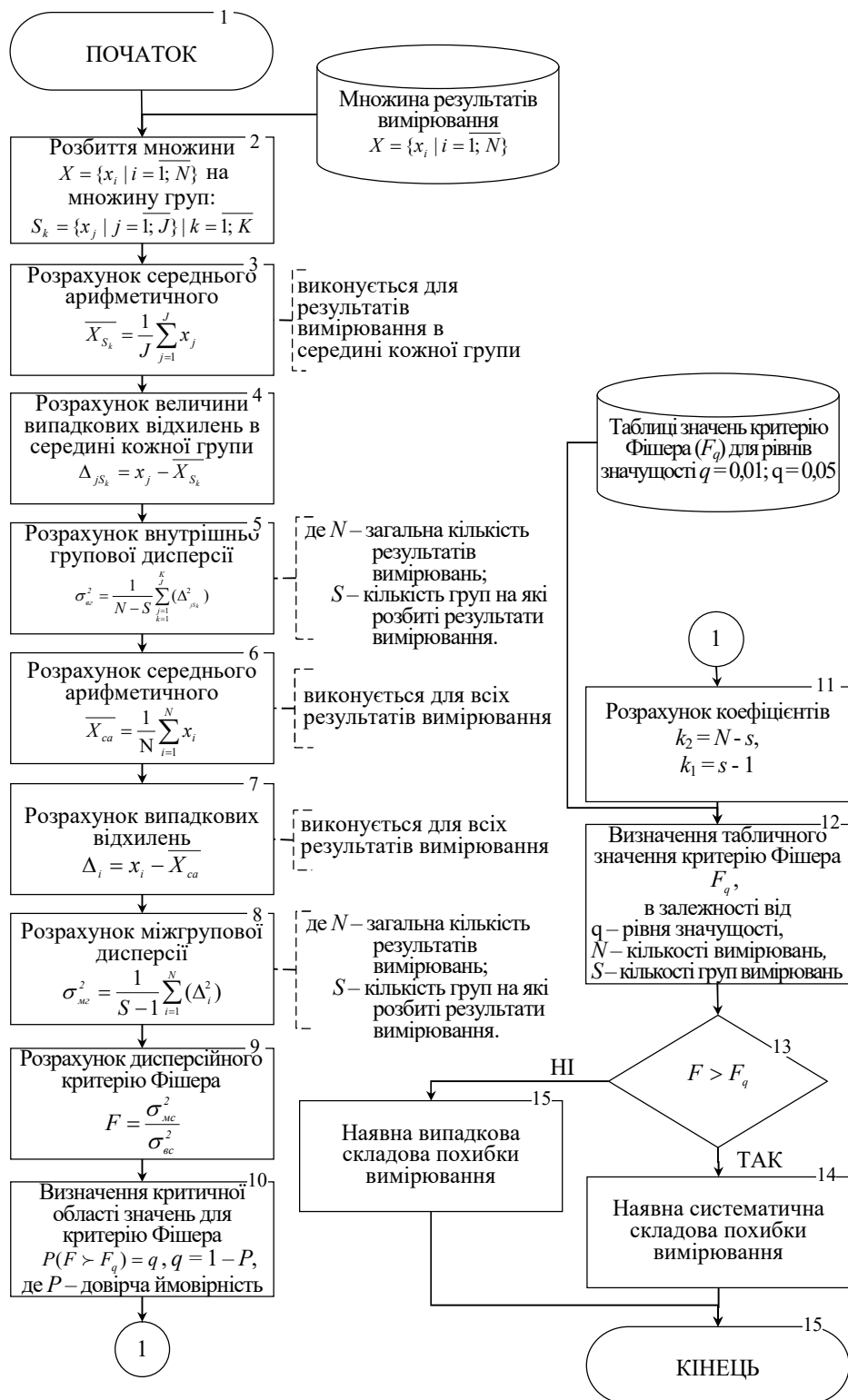


Рис. 3.26. Узагальнена блок-схема алгоритму аналітично-розрахункової процедури визначення складових похибок вимірювання із застосуванням дисперсійного критерію Фішера [60]

Таблиця 3.2

Результати аналітичного визначення складових похибки вимірювання при багаторазовому вимірюванні значень плоского кута 24-гранної призми із застосуванням дисперсійного критерію Фішера [60]

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k		
	град.	хв.	сек.
1	164	59	59,66
2	164	59	59,75
3	164	59	59,84
4	164	59	59,74
5	164	59	59,84
6	164	59	59,67
7	164	59	59,73
8	164	59	59,61
9	164	59	59,86
10	164	59	59,81
11	164	59	59,28
12	164	59	59,08
13	164	59	59,11
14	164	59	59,16
15	164	59	59,18
16	164	59	59,11
17	164	59	59,37
18	164	59	59,33
19	164	59	59,37
20	164	59	59,37
21	164	59	59,42
22	164	59	59,43
23	164	59	59,36
24	164	59	59,35
25	164	59	59,34
26	164	59	59,27
27	164	59	59,36
28	164	59	59,05
29	164	59	59,18

30	164	59	59,18
31	164	59	59,43
32	164	59	59,23
33	164	59	59,28
34	164	59	59,36
35	164	59	59,32
36	164	59	59,18
37	164	59	59,35
Значення критерію Фішера			
розрахункове F			2,39
табличне F_q	$F_{0,01 P=0,99}$		4,41
	$F_{0,05 P=0,95}$		2,88
Висновок: У результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки вимірювання			

Саме тому в роботі [60] розроблено ШНМ визначення складових похибок вимірювання в режимі реального часу для зменшення трудомісткості та підвищення продуктивності виконуваних робіт.

ШНМ яку розроблено у роботі [60] для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання являє собою набір математичних та алгоритмічних методів для розв'язання широкого кола задач обробки та аналізу даних. В контексті розв'язуваних задач ШНМ дозволяє здійснювати інтелектуальний аналіз множини вимірюваних даних в режимі реального часу. При цьому висока оперативність, ймовірність правильної обробки інформації в умовах її неповноти та суперечливості, а також простота навчання та перенавчання дозволяють вчасно переходити на нові види розв'язуваних задач при зміні зовнішніх факторів [60].

У роботі [60] для автоматизованого визначення складових похибок вимірювання було синтезовано ШНМ прямого поширення, на базі багатошарового перцептронну. ШНМ володіє значною обчислювальною потужністю, а також здатністю до узагальнення навчального досвіду, що вигідно відрізняє її від інших ШНМ, наприклад, ШНМ Хопфілда, ШНМ Хеммінга, ШНМ з радіальними базисними елементами (RBF) та ін.

Схематична модель ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання приведена на рис. 3.27.

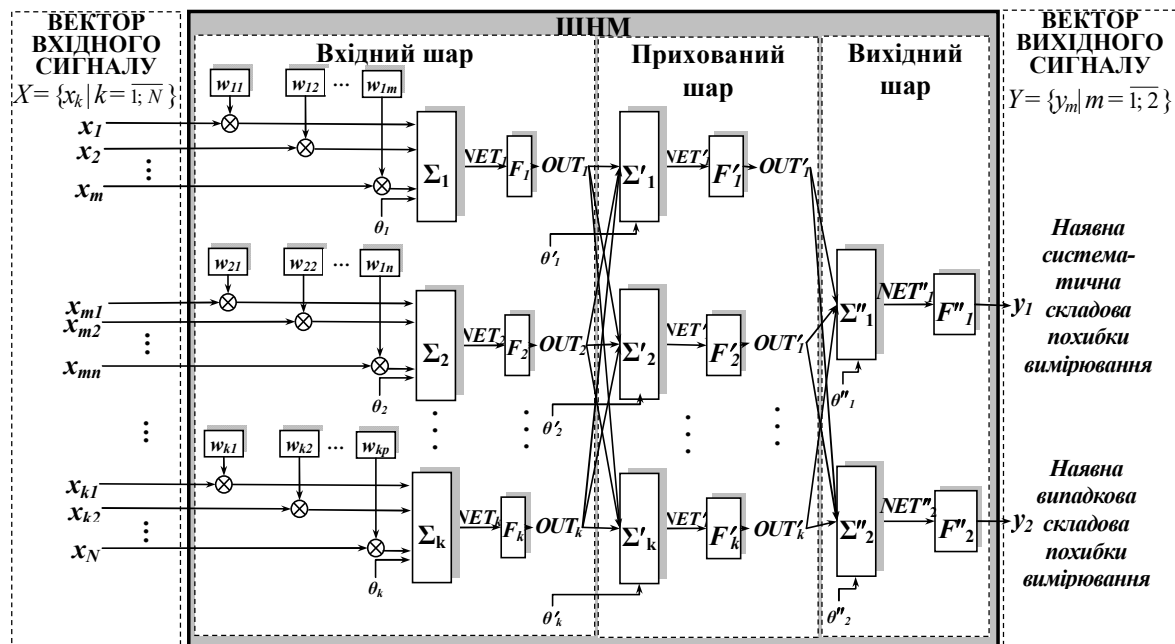


Рис. 3.27. Схематична модель ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання [60]

Структура моделі ШНМ, зокрема кількість шарів та вхідних і вихідних нейронів в шарах, обумовлено умовами задачі. В якості функції активації ШНМ обрано сигмоїду (або функцію Фермі) [60].

У роботі [60] перший так званий “вхідний” шар ШНМ утворюється вхідними нейронами і призначений для приймання вхідної інформації у вигляді вхідного вектору $X = \{x_k | k = \overline{1; N}\}$, де N – кількість вимірюваних даних. Розмірність вхідного шару обумовлюється розмірністю вхідної інформації і, відповідно, вхідного вектору. Це обумовлюється тим, що загально прийнятим способом подачі вхідних сигналів є такий, при якому всі нейрони першого (вхідного) шару отримують один вхідний сигнал. Розмірність вхідного вектору X при цьому буде обумовлюватися множиною результатів вимірювання. Наприклад, при вимірюванні кута 24-гранної призми необхідна кількість N вимірювань становить 37. В цьому випадку вхідний вектор матиме вид $X = \{x_k | k = \overline{1; 37}\}$. Структура та компоненти вхідного вектору для даного прикладу приведені в табл. 3.3.

Векторне представлення результатів вимірювання плоского кута 24-гранної призми у відповідності до вимог технології ШНМ [60]

№ з/п	Виміряні значення кута, φ_k			Векторний алфавіт
	град.	хв.	сек.	
1	164	59	59,66	x_1
2	164	59	59,75	x_2
3	164	59	59,84	x_3
4	164	59	59,74	x_4
5	164	59	59,84	x_5
6	164	59	59,67	x_6
7	164	59	59,73	x_7
8	164	59	59,61	x_8
9	164	59	59,86	x_9
10	164	59	59,81	x_{10}
11	164	59	59,28	x_{11}
12	164	59	59,08	x_{12}
13	164	59	59,11	x_{13}
14	164	59	59,16	x_{14}
15	164	59	59,18	x_{15}
16	164	59	59,11	x_{16}
17	164	59	59,37	x_{17}
18	164	59	59,33	x_{18}
19	164	59	59,37	x_{19}
20	164	59	59,37	x_{20}
21	164	59	59,42	x_{21}
22	164	59	59,43	x_{22}
23	164	59	59,36	x_{23}
24	164	59	59,35	x_{24}
25	164	59	59,34	x_{25}
26	164	59	59,27	x_{26}
27	164	59	59,36	x_{27}
28	164	59	59,05	x_{28}
29	164	59	59,18	x_{29}
30	164	59	59,18	x_{30}
31	164	59	59,43	x_{31}
32	164	59	59,23	x_{32}
33	164	59	59,28	x_{33}
34	164	59	59,36	x_{34}
35	164	59	59,32	x_{35}
36	164	59	59,18	x_{36}
37	164	59	59,35	x_{37}

Загальна структура вхідного вектору $X = \{x_k | k = \overline{1; 37}\}$:
 $X = \{x_1; x_2; x_3; x_4; x_5; x_6; x_7; x_8; x_9; x_{10}; x_{11}; x_{12}; x_{13}; x_{14}; x_{15}; x_{16}; x_{17}; x_{18}; x_{19}; x_{20}; x_{21}; x_{22}; x_{23}; x_{24}; x_{25}; x_{26}; x_{27}; x_{28}; x_{29}; x_{30}; x_{31}; x_{32}; x_{33}; x_{34}; x_{35}; x_{36}; x_{37}\}$

У вхідному шарі не здійснюються обчислювальні процедури і інформація передається з входу на вихід нейронів шляхом зміни активації нейронів [60].

У роботі [60] на виході ШНМ формується вихідний вектор Y значень наявності систематичної та випадкової складових похибок вимірювання. Рішення про наявність тієї чи іншої складової похибки вимірювання приймається так званим інтерпретатором відповіді мережі. В даному випадку застосовується інтерпретатор „переможець отримує все”, в якому кількість вихідних сигналів відповідає кількості варіантів відповіді, а номер відповіді відповідає номеру нейрона, що видав максимальний сигнал на виході. Тобто при визначенні складових похибок вимірювання може бути два варіанта відповіді: “у результатах вимірювання наявна систематична складова похибки вимірювання” та “у результатах вимірювання наявна випадкова складова похибки вимірювання”. Відповідно, структура вихідного вектору може бути представлена наступним чином: $Y = \{y_m | m = \overline{1;2}\}$ (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Характеристика вихідного вектору ШНМ [60]

Складова похибки вимірювання	Інформація про наявність складової похибки у результатах вимірювання	Векторний алфавіт	
		максимальне значення сигналу	компоненти вихідного вектору
Систематична	наявна	1	y_1
	відсутня	0	
Випадкова	наявна	1	y_2
	відсутня	0	
Загальна структура вихідного вектору $Y = \{y_m m = \overline{1;2}\}$: $Y = \{y_1; y_2\}$			

Структура вихідного вектору обумовлює розмірність вихідного шару ШНМ [60].

У роботі [60] у “прихованому” шарі здійснюється проміжна обробка інформації таким чином, що на вихідний шар нейронів подаються лінійно-розділені множини. Розмірність прихованого шару визначалась емпірично

в два етапи та варіювалась під час експериментальних досліджень ШНМ. Зокрема, на першому етапі синтезу ШНМ кількість нейронів прихованого шару була прийнята рівною кількості нейронів на вході. На другому етапі, при навчанні ШНМ кількість нейронів прихованого шару коригувалась в залежності від успішності її навчання. При цьому граничні значення кількості нейронів прихованого шару розраховувались за відомими евристичними формулами.

Для практичної реалізації ШНМ авторами статті [60] використовувались спеціальні програмні засоби – нейроімітатори, зокрема, нейроімітатор Neural Analyzer, що входить до складу аналітичного пакета Deductor Professional компанії BaseGroupLabs.

Автори роботи [60] навчання ШНМ проводили методом “навчання з вчителем” за алгоритмом Back propagation (зворотного поширення помилки). Для цього була сформована навчальна база даних (БД) як множина пар векторів $\langle X_i; Y_i \rangle$, де i – кількість елементів у навчальній БД, $\{X_i\} = \{x^1, \dots, x^s\}$ – умова задачі у векторній формі; $\{Y_i\} = \{y^1, \dots, y^k\}$ – бажане значення виходів ШНМ для цієї умови. Наприклад, для випадку визначення складових похибки вимірювання плоского кута 24-гранної призми розмір навчальної БД склав 60 прикладів. Навчальна БД була сформована за результатами реальних багаторазових спостережень при вимірюванні плоского кута 24-гранної призми та за результатами імітаційного моделювання на ЕОМ. В якості умови щодо встановлення розміру навчальної БД виступало відоме твердження, що кількість пар векторів $\langle X_i; Y_i \rangle$ навчальної БД повинна бути такою, щоб під керуванням алгоритму можна було сформулювати такий набір параметрів ШНМ, який дав би потрібне відображення перетворення сигналів вхідного вектора X у вихідний вектор Y . Фрагмент екранної копії програми з навчальною множиною для навчання ШНМ для визначення складових похибки вимірювання плоского кута 24-гранної призми, обраної як приклад, приведено на рис. 3.28 [60].

№ прикладу навчальної множини	Результат вимірювання / № з/п вимірювання																Складові похибки вимірювання							
																	Систематична	Випадкова						
	Вхідний вектор																Вихідний вектор							
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10							X35	X36	X37	X38	X39	X40	Y1	Y2
1	60	60	60,5	60	60	60,5	60	60	60,5	60							0	0	0	0	0	0	1	0
2	60	60	60,5	60	60	60,5	60	60	60,5	60							60,5	60	60	60,5	60	60	0	1
3	60	60	60,5	60	60	60,5	60	60	60,5	60							0	0	0	0	0	0	1	0
4	60	60	60,5	60	60	60,5	60	60	60,5	60							60,5	60	60	60,5	60	60	0	1
5	60	60	60,5	60	60	60,5	60	60	60,5	60							60,5	60	60	60,5	60	60	1	0
6	1,04	1,16	2,98	1,26	0,06	2,59	2,71	2,34	59,9	0,83							0,62	2,68	1,9	2,86	1,34	2,79	0	1
7	1,04	1,16	2,98	1,26	0,06	2,59	2,71	2,34	59,9	0,83							0,06	2,59	2,71	2,34	59,9	0,83	0	1
8	1,04	1,16	2,98	1,26	0,06	2,59	2,71	2,34	59,9	0,83							0,06	2,54	2,7	2,31	0,83	2,42	0	1
9	1,03	1,03	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04							0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01							1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01							1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	1	0

Рис. 3.28. Екранна копія програми з фрагментом навчальної множини для навчання ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання [60]

Автори роботи [60] вказують, що навчання ШНМ полягає у зменшенні середньої квадратичної похибки E між фактичними значеннями вихідних сигналів $Y' = \{y'_1, \dots, y'_m\}$ та бажаними значеннями $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ виходів ШНМ.

Експериментальне дослідження впливу параметрів ШНМ, зокрема розмірності її прихованого шару, на правильність визначення складових похибок вимірювання авторами роботи [60] проводилось з використанням нейроімітатору Neural Analyzer, аналітичного пакета Deductor Professional компанії BaseGroupLabs. Для цього була попередньо згенерована навчальна множина. Критерієм оптимізації навчального алгоритму була величина середньої квадратичної похибки E в розмірі 5 %, тобто $E=0,05$. Величина кроку 0,1; момент 0,9; крутизна функції активації 1 [60].

Кількість нейронів прихованого шару змінювалась в діапазоні, що був попередньо розрахований [60].

Результати експериментального дослідження зміни похибки роботи ШНМ в залежності від кількості нейронів прихованого шару представлено в табличній (табл. 3.5) та графічній (рис. 3.29) формі [60].

Таблиця 3.5

Параметри досліджуваних ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання з різною розмірністю прихованого шару та час їх навчання [60]

Умовна назва ШНМ	Параметри досліджуваних ШНМ	Кількість ітерацій навчання	Час роботи, с	Розмір навчальної множини
ШНМ 1	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 37 нейронів	52	1 с.	60 прикладів
ШНМ 2	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 40 нейронів	72	2 с.	
ШНМ 3	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 57 нейронів	284	4 с.	
ШНМ 4	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 67 нейронів	310	17 с.	
ШНМ 5	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 100 нейронів	350	21 с.	
ШНМ 6	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 20 нейронів	43	1 с.	
ШНМ 7	Вхідний шар – 37 нейронів, вихідний шар – 2 нейрони, прихований шар – 1 нейрон	40	1 с.	
Діапазон зміни величини прихованого шару		від 1 до 67 нейронів		

Средня квадратична похибка, %

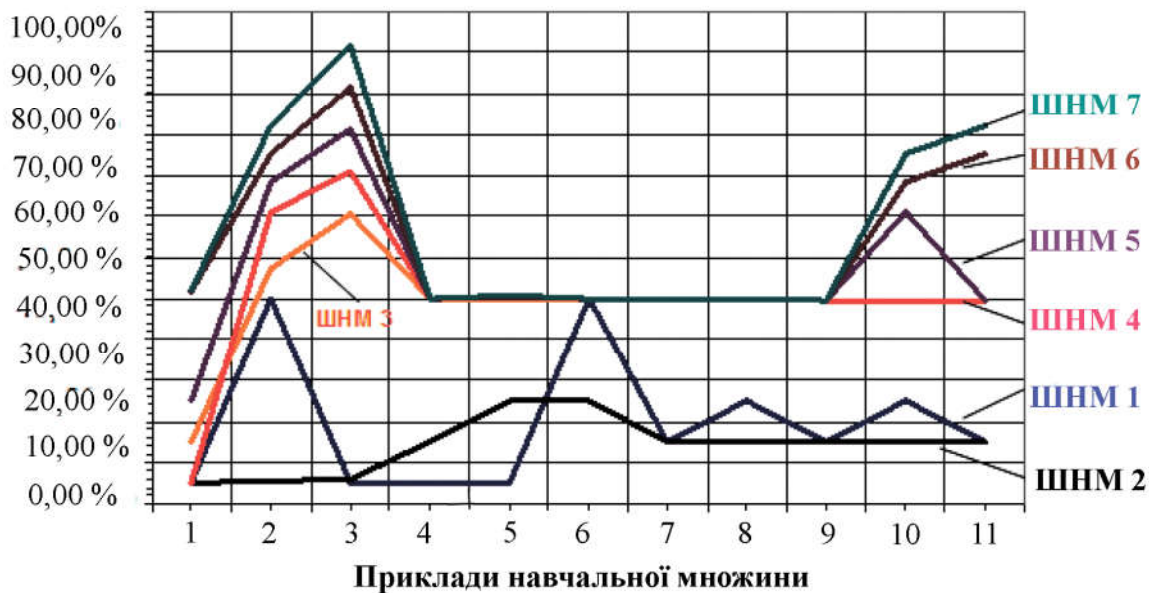


Рис. 3.29. Графік зміни величини середньої квадратичної похибки для ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання з різною розмірністю прихованого шару за табл. 3.5

Для вирішення поставленої задачі досліджувалась робота ШНМ з різною розмірністю прихованого шару. ШНМ з різною розмірністю прихованого шару умовно було названо ШНМ 1 – ШНМ 7. Результати експериментального дослідження у відповідності до табл. 3.5 та рис. 3.29 показали наступне [60]:

– при недостатній кількості нейронів прихованого шару ШНМ погано навчається і похибка при роботі залишається досить великою (ШНМ 6, ШНМ 7) [60];

– надмірне збільшення кількості нейронів прихованого шару призводить до того, що добре навчена ШНМ не буде проявляти узагальнюючих властивостей і похибка роботи буде занадто великою (ШНМ 3, ШНМ 4, ШНМ 5). Крім того надмірне збільшення кількості нейронів прихованого шару погіршує роботу ШНМ, що проявляється в зменшенні її швидкодії (ШНМ 4, ШНМ 5) [60].

Вказане свідчить про можливість застосування ШНМ 2 з наступними параметрами: кількість входів – 37 нейронів, кількість виходів – 2 нейрони,

кількість нейронів прихованого шару – 40 нейронів, кількість прихованих шарів – 1 (табл. 3.5). Вказана ШНМ дозволила визначити випадкову складову похибки вимірювання при визначенні плоского кута 24-гранної призми за результатами багаторазового вимірювання ($N=37$) за 2 с (табл. 3.5) [60].

Розроблена ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання в DataMining дозволяє зменшити трудомісткість та підвищити продуктивність виконуваних робіт, може працювати в умовах зашумленості та спотворення вхідних даних, дозволяє підвищити точність аналізу даних при вимірюваннях. Дане твердження обґрунтоване тим, що для розглянутого прикладу, щодо визначення складових похибки вимірювання плоского кута 24-гранної призми, застосування ШНМ дозволило здійснити визначення складових похибки вимірювання за 2 с. При цьому застосування аналітично-розрахункової процедури вимагає від оператора виконання 223 математичних операції (зокрема 114 операцій додавання, 46 – віднімання, 46 – множення та 17 – ділення). Очевидно, що час, який буде втрачений, значно перевищить час, витрачений ШНМ [84].

Висока продуктивність ШНМ забезпечується можливістю здійснювати паралельну обробку вимірювальної інформації в режимі реального часу. При цьому висока оперативність, ймовірність правильної обробки інформації в умовах її неповноти та суперечливості, а також простота навчання та перенавчання ШНМ дозволяють вчасно переходити на нові види розв'язуваних задач [60].

Можливість швидкого та правильного визначення складових похибок вимірювання на етапі аналізу вимірювальної інформації дозволяє в наступному визначати методи її подальшої обробки у відповідності до нормативних вимог. Це в перспективі забезпечить підвищення точності та достовірності результатів вимірювання тому, що дозволить уникнути некоректних та неточних обчислень при нормуванні похибок вимірювання [60].

На сьогодні відома низка досліджень в напрямку автоматизованого визначення похибок вимірювання за допомогою ШНМ. Проте відсутні

роботи щодо інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання з використанням ШНМ, що можуть проводитись ще на етапі аналізу вимірювальної інформації.

Варто вказати, що основною вимогою щодо застосування ШНМ для інтелектуального аналізу складових похибок вимірювання є висока кваліфікація персоналу, що відповідно, може вимагати його додаткового навчання або частково обмежувати застосування ШНМ [60].

3.5. Технологія fuzzy logic

Нечітка логіка (англ. *fuzzy logic*) була винайдена та сформульована у 1965 р. американським вченим Лотфі Заде. Цікаво, що народився Лотфі Заде у м. Баку в Азербайджані і до десяти років проживав із сім'єю саме там. Але у 1931 р. родина Лотфі Заде іммігрувала з країни.

Fuzzy logic сформульована Лотфі Заде у вигляді математичного апарату що дозволяє моделювати нечіткість людських суджень. Автор показав, що у протилежність до традиційної двозначної (бінарної) логіки або алгебри логіки за якою висловлювання можуть приймати тільки два значення – істинності (що становить 1) або хибності (що становить 0), у теорії Fuzzy logic ступінь істинності будь-якого твердження приймає множину значень між істинністю та хибністю (тобто множину значень між 0 і 1) [35]. Натомість у Fuzzy logic використовується значення *степеня істинності*, що може бути рівним довільному числу із множини чисел від 0 до 1 включно. Тому у Fuzzy logic логічні операції вони задаються функціями приналежності [35].

Винайдення теорії *Fuzzy logic* стало настільки суттєвим революційним науковим винаходом, що навіть у провідних наукових країнах світу, які завжди приділяють особливу увагу розвитку наукової новизни, відношення до неї протягом близько 20 років було прохолодним та з опаскою. На сьогодні *Fuzzy logic* є широко розповсюдженим математичним апаратом у сфері нечіткого керування завдячуючи японцям. Саме в Японії у 80-х роках ХХ ст. було започатковане успішне практичне використання *fuzzy logic* при розробці *fuzz*-регуляторів зі штучним інтелектом. *Fuzz-*

регулятори являли собою однокристальні мікроконтролер зі швидкістю формування до 10 млн. нечітких логічних висновків у секунду. На сьогодні Японія все що залишається передовою країною щодо впровадження та практичного застосування *fuzzy logic* [35].

У літературі [35] вказується, що математична теорія нечітких множин дозволяє описувати нечіткі поняття і знання, оперувати цими знаннями і робити нечіткі висновки. Нечітке управління виявляється особливо корисним, коли технологічні процеси є занадто складними для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів або коли доступні джерела інформації інтерпретуються якісно, неточно або невизначено. Нечітка логіка, на якій засновано нечітке управління, ближче до людського мислення і природних мов, ніж традиційні логічні системи. Нечітка логіка в основному забезпечує ефективні засоби відображення невизначеностей і неточностей реального світу. Наявність математичних засобів відображення нечіткості вихідної інформації дозволяє побудувати модель, адекватну реальності [35].

Нечітка множина відрізняється від звичайної множини тим, що для всіх елементів множини або їх частини не існує однозначної відповіді на питання: “Чи належить або не належить той чи інший елемент розглянутій нечіткій множині?” [35].

Формально нечітка множина A визначається як безліч впорядкованих пар або кортежів виду: $\langle x, \mu_A(x) \rangle$, де x є елементом деякої універсальної множини або універсуму E , а $\mu_A(x)$ – функція приналежності (або ступінь приналежності), яка ставить у відповідність кожному з елементів $x \in E$ деяке дійсне число з інтервалу $[0, 1]$, тобто. дана функція визначається у формі відображення:

$$\mu_A(x) : E \rightarrow [0, 1].$$

При цьому $\mu_A(x)=1$ для деякого $x \in E$ означає, що елемент x однозначно належить нечіткій множині A , а значення $\mu_A(x) = 0$ означає, що елемент x однозначно не належить нечіткій множині A .

Функція приналежності може бути визначена явно у вигляді функціональної залежності (наприклад, $\mu_A(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-1}{2}\right)^2\right)$), або дискретно – шляхом завдання кінцевої послідовності значень $x \in \{x_i\}$ у вигляді:

$$A = \{\mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n\}$$

або у вигляді

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} \right\}.$$

При цьому похила “/” або горизонтальна риска є просто роздільником, а знак “+” означає не арифметичне додавання, а теоретико-множинне об’єднання окремих елементів. Нескінченні нечіткі множини іноді записують зі знаком інтегралу у вигляді $\int \mu_A(x)/x$. Бажаючи підкреслити або явно вказати, що множина A є нечіткою, іноді часто записують нечітку множину зі знаком тільда “ \sim ” зверху, тобто у формі \tilde{A} [35].

Ефективність моделі проявляється у її здатності адекватно вирішити ту чи іншу конкретну проблему [35].

Досягнуті в останній час успіхи у застосуванні нечітких технологій для розв’язання самих різноманітних практичних задач дозволяють стверджувати, що нечітке моделювання реальних складних систем – ефективна альтернатива традиційним математичним моделям і методам [35].

Не має ніяких обмежень на вибір конкретної функції приналежності. На практиці зручно використовувати такі, які допускають аналітичне представлення у вигляді простої математичної функції. В нечіткій логіці для заданої функції приналежності використовуються наступні типові форми наведених нижче функцій (рис. 3.30) [35]:

- Трикутна (trimf);
- Трапециподібна (trapmf);

- Гаусова (gaussmf);
- Подвійна гаусова (gauss2mf);
- Узагальнена дзвоноподібна (gbellmf);
- Сигмоїдна (sigmf);
- Подвійна сигмоїдна (dsigmf);
- Добуток двох сигмоїдних функцій (psigmf);
- Z-функція;
- S-функція;
- P-функція.

Конкретний вид даних функцій визначається значеннями параметрів, що входять до їх аналітичного представлення, наприклад [35]:

Трикутна: $trimf(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$;

Трапециподібна: $trapmf(x, a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{c-b}\right), 0\right)$;

Гаусова: $gaussmf(x, \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$;

Узагальнена дзвоноподібна: $bellmf(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}$;

Сигмоїдна: $sigmf(x, a, c) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))}$ та ін.

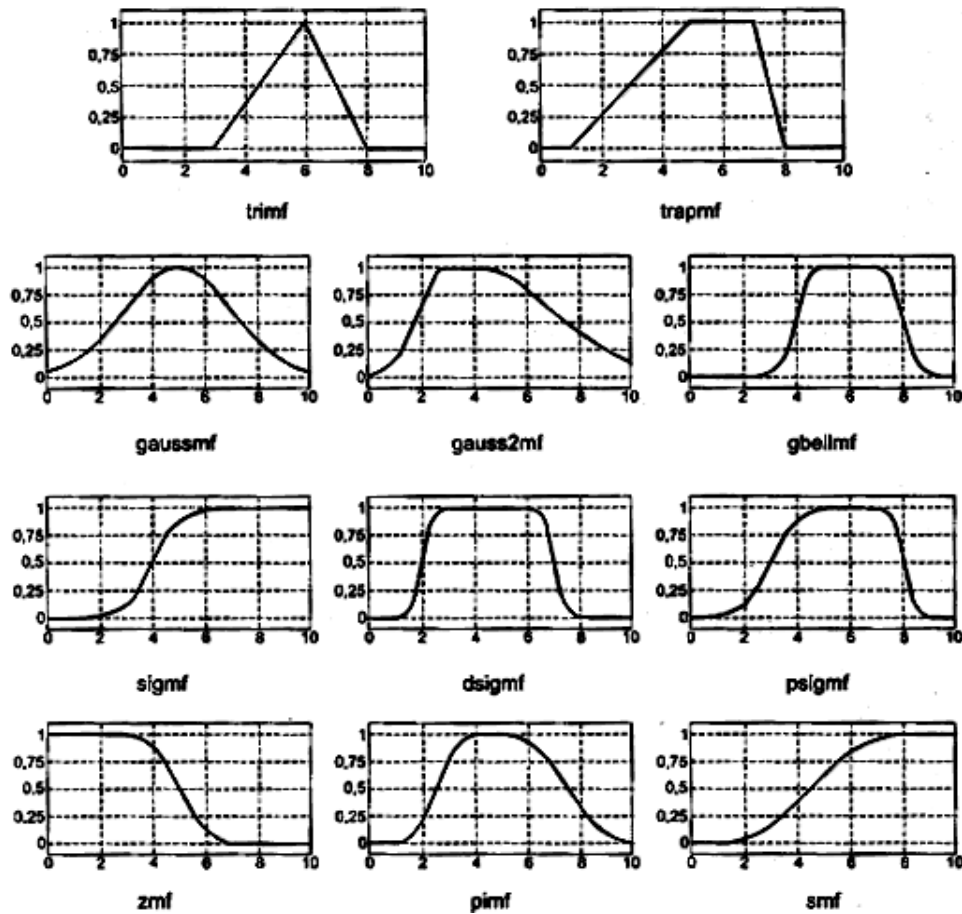


Рис. 3.30. Типові функції приналежності нечітких множин [35].

Основні логічні операції, які можливі з нечіткими множинами описано в літературі [35]. В даному навчальному посібнику наводимо їх короткий опис.

1. **Включення.** Нехай A та B – нечіткі множини на універсальній множині E . Кажуть, що A міститься в B , якщо $\forall x \in E \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ [35].

Позначення: $A \subset B$.

Іноді використовують термін “домінування”, тобто у випадку, коли $A \subset B$, кажуть, що B домінує над A [35].

2. **Рівність.** A і B , якщо $\forall x \in E \mu_A(x) = \mu_B(x)$.

Позначення $A = B$.

3. **Доповнення.** Нехай A та B – нечіткі множини задані на E . A і B доповнюють одна одну, якщо $\forall x \in E \mu_A(x) = 1 - \mu_B(x)$.

Позначення $B = \bar{A}$ або $A = \bar{B}$.

Очевидно, що $\overline{\bar{A}} = A$.

4. *Перетин.* $A \cap B$ – найбільша нечітка підмножина, що містить одночасно в A і B :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

5. *Об'єднання.* $A \cup B$ – найменша нечітка підмножина, що включає як A так і B з функцією приналежності:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

6. *Різниця.* $A - B = A \cap \bar{B}$ з функцією приналежності

$$\mu_{A-B}(x) = \min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x))$$

Нечітка імплікація. Імплікацією (в традиційній “чіткій” логіці) “якщо p то q ” називається вираз, який хибний тоді і тільки тоді, якщо p істинне, то q хибне [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Такий вид відносин між висловлюваннями зазвичай позначається як $p \rightarrow q$ і розуміється як твердження “ p тягне за собою (викликає, впливає на) q ” [35].

Якщо перейти до бінарної (булевої) алгебри логіки, де з поняттям “істина” зіставляється 1, а з поняттям “хибність” – 0, то імплікацію можна представити логічною формулою [35]

$$p \leftarrow q = \bar{p} \vee q = \overline{(p \wedge \bar{q})}$$

або таблицею істинності

p	q	$p \rightarrow q$
1	1	1
0	1	1
0	0	1
1	0	0

Нечітка імплікація, в принципі, зберігає той же зміст, що і імплікація чіткої логіки. Відмінність полягає лише в тому, що в цьому випадку “ступені істинності” можуть мати будь-які значення, що лежать в інтервалі від 0 і 1 [35].

Нечітка імплікація визначається, зазвичай наступним чином. Вважатимемо, що задано універсальні множини X і Y , які містять кінцеву кількість елементів. Під способом визначення нечіткої імплікації “якщо A , то B ”, де A і B – нечіткі множини на X та Y відповідно (наприклад: “якщо

температура – велика, то швидкість близька до нуля”), будемо розуміти спосіб завдання нечіткого відношення R на $X \times Y$, яке відповідає даному висловлюванню [35].

Таке відношення можна задати по-різному, тому для математичного представлення нечіткої імплікації запропоновано велику кількість різних формул, деякі з яких разом з прізвищами запропонували їх авторів наведені нижче [35]:

- 1) Larsen: $\mu_R(x, y) = \mu_A(x)\mu_B(y)$;
- 2) Lukasiewicz: $\mu_R(x, y) = \min\{1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)\}$;
- 3) Mamdani: $\mu_R(x, y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$;
- 4) Godel: $\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \mu_A(x) \leq \mu_B(y), \\ \mu_B(y) & \text{у протилежному випадку} \end{cases}$;
- 5) Kleene-Dienes: $\mu_R(x, y) = \max\{1 - \mu_A(x), \mu_B(y)\}$;
- 6) Kleene-Dienes-Luk: $\mu_R(x, y) = 1 - \mu_A(x) + \mu_A(x)\mu_B(y)$.

Механізм формування висновків у звичайній (чіткій) логіці

Проілюструємо механізм побудови висновку на прикладі обчислень значення деякої функції $y = f(x)$. Тут можна виділити наступну послідовність дій [35]:

передумова: $y = f(x)$

факт: $x = x_0$

наслідок: $y_0 = f(x_0)$

Щось подібне відбувається і при операціях з нечіткими поняттями і числами [35].

Відзначимо спочатку, що механізм нечітких висновків який використовується в різного роду експертних і керуючих системах у своїй основі має базу знань, що формується фахівцями предметної області у вигляді сукупності нечітких предикатних правил виду [35]:

- Π_1 : якщо $x \in A_1$ тоді $y \in B_1$,
- Π_2 : якщо $x \in A_2$, тоді $y \in B_2$,
-
- Π_m : якщо $x \in A_m$, тоді $y \in B_m$,

де x – вхідна змінна (ім'я для відомих значень даних),
 y – змінна висновку (ім'я для значення даних, яке буде обчислено);
 A_i та B_i – нечіткі множини, визначені відповідно на X і Y [35].

Приклад подібного правила:

Якщо x – “низьке”, то y – “високе”.

Механізм нечіткого висновку можна представити у вигляді, аналогічному раніше наведеним [35]:

передумова:

- Π_1 : якщо $x \in A_1$ тоді $y \in B_1$,
- Π_2 : якщо $x \in A_2$, тоді $y \in B_2$,
-
- Π_m : якщо $x \in A_m$, тоді $y \in B_m$,

Факт: $x \in A$

Наслідок: $y \in B$

Знання експерта $A \rightarrow B$ відображає нечітке причинне відношення передумови і висновку, тому його можна назвати нечітким відношенням і позначити через R [35]:

$$R = A \rightarrow B,$$

де, як і раніше, символ “ \rightarrow ” означає нечітку імплікації.

Відношення R можна розглядати як нечітку підмножину прямого добутку $X \times U$ повної множини передумов X і висновків U . Таким чином, процес отримання (нечіткого) результату висновку B з використанням даного спостереження A' та знання $A \rightarrow B$ можна представити у вигляді формули [35]:

$$B' = A' \bullet R = A' \bullet (A \rightarrow B),$$

де « \bullet » – введена вище операція згортки.

Процедура формування нечіткого виводу

Процедура формування логічного висновку виконується у чотири етапи. При цьому для формування нечіткого виводу використовують спеціальні алгоритми, серед яких найбільш поширеними є алгоритм Мамдані (Mamdani), Сугено (Sugeno) і Такагі (Takagi) інформація, про які подана далі [35].

1. *Введення нечіткості, фазифікація (fuzzification).* Функції приналежності, визначені на вхідних змінних, застосовуються до їх фактичних значень для визначення ступеня істинності кожної передумови кожного правила [35].

2. *Логічний висновок.* Обчислення значення істинності для передумов кожного правила застосовується до висновків кожного правила. Це призводить до однієї нечіткої підмножини, яка буде призначено кожній змінній висновку для кожного правила. В якості правил логічного висновку зазвичай використовуються тільки операції \min (МІНІМУМ) або prod (МНОЖЕННЯ). У логічному висновку МІНІМУМУ функція приналежності висновку “відсікається” по висоті, що відповідає обчисленою ступеня істинності передумови правила (нечітка логіка “І”), У логічному висновку МНОЖЕННЯ функція приналежності висновку

масштабується за допомогою обчисленого ступеня істинності передумови правила [35].

3. *Агрегація*. Всі нечіткі підмножини, призначені до кожної змінної висновку (у всіх правилах), об'єднуються разом, щоб формувати одну нечітку підмножину для кожної змінної висновку. При подібному об'єднанні зазвичай використовуються операції *max* (МАКСИМУМ) або *sum* (СУМА). При композиції МАКСИМУМУ комбінований висновок нечіткої підмножини конструюється як поточечний максимум за всіма нечіткими підмножини (нечітка логіка “АБО”), при композиції СУМИ комбінований висновок нечіткої підмножини конструюється як поточечна сума за всіма нечіткими підмножинами, призначеними змінній висновку правилами логічного висновку [35].

4. *Приведення до чіткості (дефазифікація, defuzzification)*, яке використовується, коли корисно перетворити нечіткий набір висновків в чітке число [35].

Алгоритм Мамдані

Алгоритм Мамдані (Mamdani) є одним із широко поширених алгоритмів нечіткого виводу [35]. Він математично може бути описаний наступним чином:

1. Нечіткість: знаходяться ступеня істинності для передумов кожного правила [35]:

$$\mu_{A_1}(x_0), \mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_1}(y_0), \mu_{B_2}(y_0).$$

2. Нечіткий висновок: знаходяться рівні “відсікання” для передумов кожного з правил (з використанням операції МІНІМУМ) [35]:

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0);$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0),$$

де через “ \wedge ” позначена операція логічного мінімуму (*min*), потім знаходяться “усічені” функції приналежності [35]:

$$\mu_{C_1}(z) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z));$$

$$\mu_{C_2}(z) = (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)).$$

3. Композиція з використанням операції МАКСИМУМ (max, далі позначається знаком “ \vee ”) виконується об'єднання знайдених усічених функцій, що призводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінної виходу з функцією приналежності [35]:

$$\mu_{\Sigma}(z) = \mu_C(z) = \mu_{C_1}(z) \vee \mu_{C_2}(z) = (\alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(z)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(z)).$$

4. Приведення до чіткості (для знаходження z_0) проводиться, наприклад, центроїдним методом [35].

Алгоритм Сугено

Сугено (Sugeno) і Такагі (Takagi) використовували набір правил у наступній формі [35]:

П₁: якщо $x \in A_1$ та $y \in B_1$, тоді $z_1 = a_1x + b_1y$;

П₂: якщо $x \in A_2$, та $y \in B_2$, тоді $z_2 = a_2x + b_2y$.

Представлення алгоритму [35].

1. Перший етап – аналогічно до алгоритму Мамдані.

2. На другому етапі знаходять $\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$, $\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0)$ та індивідуальні виходи правил [35]:

$$\dot{z}_1 = a_1x_0 + b_1y_0,$$

$$\dot{z}_2 = a_2x_0 + b_2y_0.$$

3. На третьому етапі визначають чітке значення змінної виводу [35]:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \dot{z}_1 + \alpha_2 \dot{z}_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Рис. 3.31 ілюструє алгоритм Сугено (Sugeno) і Такагі (Takagi).

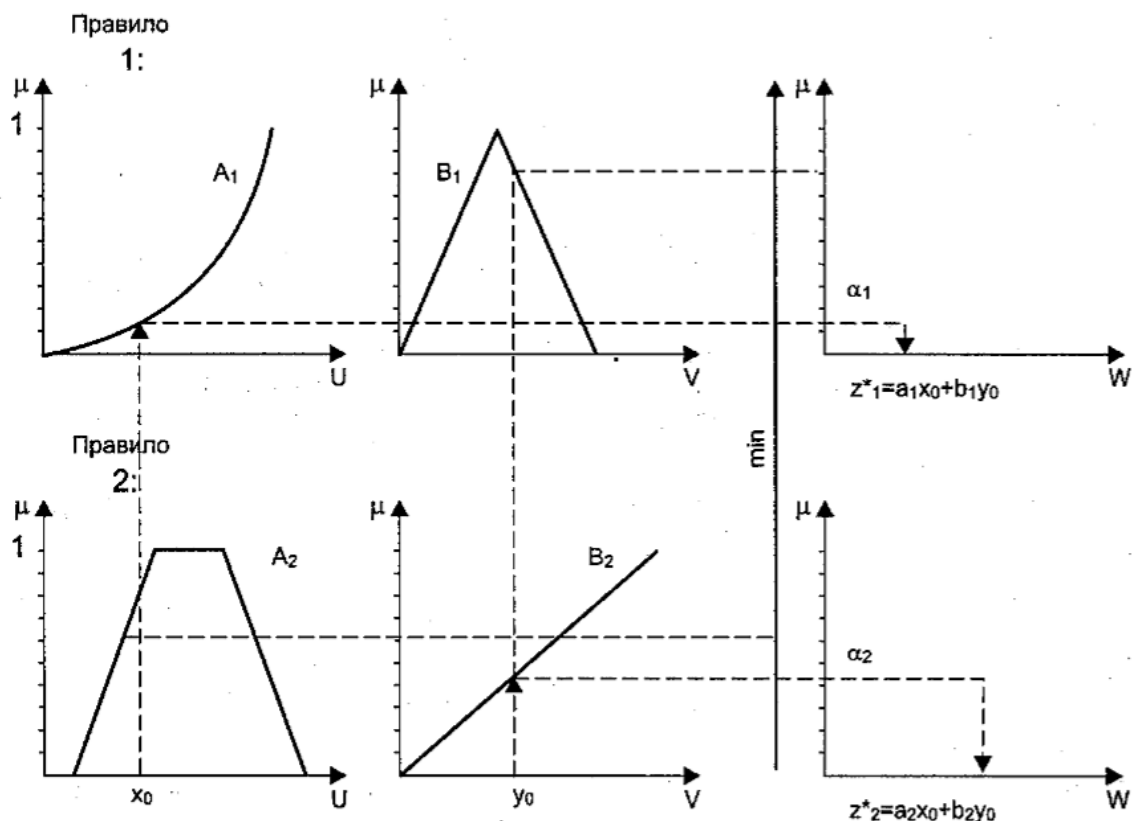


Рис. 3.31. Ілюстрація до алгоритму нечітких висновків Сугено [35]

Пакет Fuzzy Logic Toolbox

Пакет нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox – це пакет прикладних програм, що відносяться до теорії розмитих або нечітких множин і дозволяють конструювати так звані нечіткі експертні та/або керуючі системи [35]. До основних можливостей пакету слід віднести:

- 1) побудова систем нечіткого виводу (експертних систем, регуляторів, апроксиматорів залежностей) [35];
- 2) побудова адаптивних нечітких систем (гібридних нейронних мереж) [35];
- 3) інтерактивне динамічне моделювання систем з нечіткою логікою у середовищі пакету блокового моделювання Simulink [35].

Пакет забезпечує роботу:

- 1) в режимі командного рядка [35];
- 2) у вікнах графічного інтерфейсу [35];
- 3) у середовищі пакету розширення Simulink [35].

Пакет Fuzzy Logic Toolbox може працювати в операційному середовищі системи MATLAB. Спільно з Fuzzy Logic Toolbox можуть використовуватися і інші пакети розширення, зокрема, пакет Simulink, що значно підвищує наочність рішень [35].

Графічний інтерфейс пакета Fuzzy Logic Toolbox

Більшість додатків системи MATLAB має кращу наочну реалізацію при використанні засобів графічного інтерфейсу користувача GUI (Graphical User Interface). До складу програмних засобів Fuzzy Logic Toolbox входять наступні основні програми, що дозволяють працювати в режимі GUI [35]:

– редактор нечіткої системи виведення Fuzzy Inference System Editor (FIS Editor або FIS-редактор) разом з допоміжними програмами – редактором функцій приналежності (Membership Function Editor), редактором правил (Rule Editor), переглядачем правил (Rule Viewer) і переглядачем поверхні відгуку (Surface Viewer) [35];

– редактор гібридних систем (ANFIS Editor, ANFIS-редактор);
– програма пошуку центрів кластерів (програма Clustering – кластеризація) [35].

Набір даних програм надає користувачу максимальну зручність при створенні, редагуванні та використанні різних систем нечіткого виводу [35].

Редактор FIS є основним засобом, що використовується для створення або редагування систем нечіткого виводу в графічному режимі. Редактор FIS може бути відкритий за допомогою введення функції (команди) `fuzzy` або `fuzzy ('FISfile')` в командному рядку (рис. 3.32) [35].

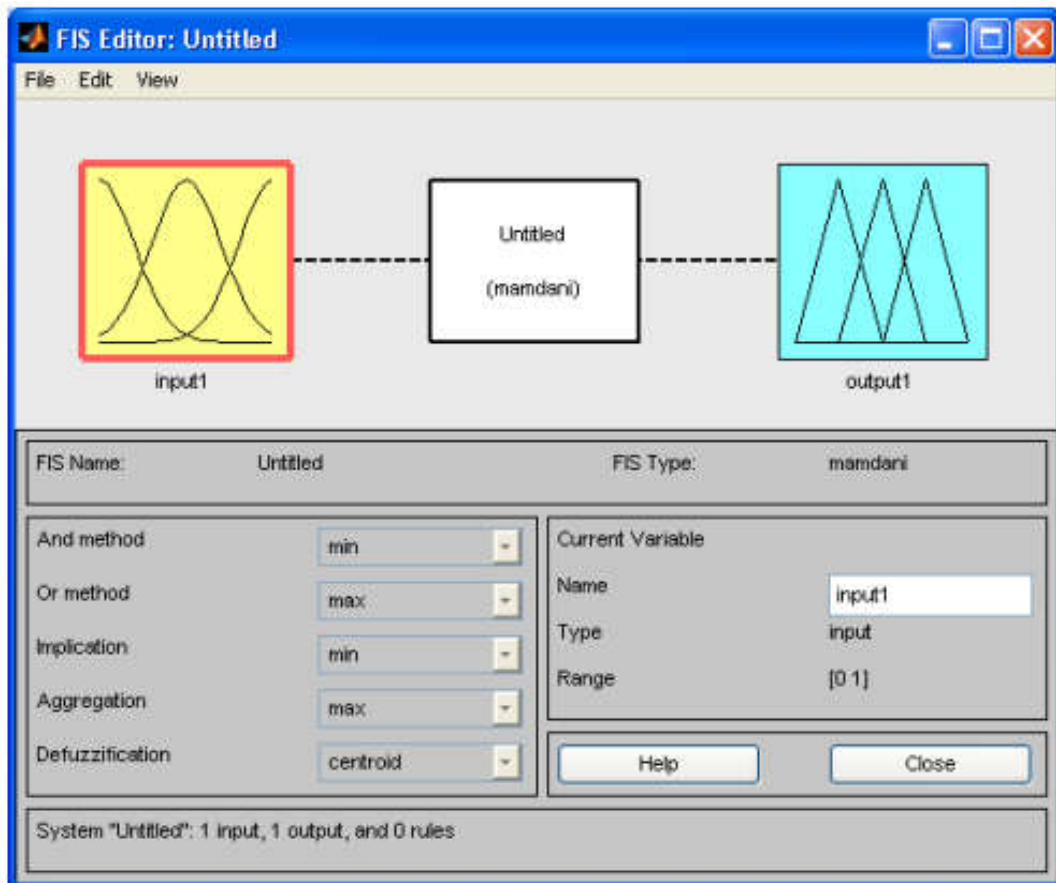


Рис. 3.32. Графічний інтерфейс редактора FIS, що викликається командою `fuzzy` [35]

Якщо функція `fuzzy` викликається без аргументів, то редактор FIS викликається для новостворюваної системи нечіткого виведення з іменем `Untitled` за замовчуванням. За замовчуванням також задається ряд таких параметрів, таких як тип системи нечіткого виведення (Мамдані), нечіткі логічні операції, методи імплікації, дефазифікації тощо. Користувач може погодитися з цими значеннями або змінити їх [35].

Якщо функція `fuzzy` викликається з аргументом у формі `fuzzy` ('FISfile'), де `FISfile` – ім'я зовнішнього файлу з розширенням `.fis` із заздалегідь розробленою системою нечіткого виведення, то редактор викликається з уже завантаженою системою FIS з ім'ям `FISfile` [35].

FIS-редактор містить 8 меню. Це три загальносистемних меню – `File`, `Edit`, `View`, і п'ять меню для вибору параметрів нечіткого логічного виводу – `And Method`, `Or Method`, `Implication`, `Aggregation` і `Defuzzification` [35].

Проектування систем нечіткого виводу типу Мамдані

Наприклад, розглянемо залежність $y = x_1^2 \cdot \sin(x_2 - 1)$, де $x_1 \in [-7, 3]$, а $x_2 \in [-4.4, 1.7]$. Для побудови тримірного зображення даної функції в області $x_1 \in [-7, 3]$, $x_2 \in [-4.4, 1.7]$ складається наступна програма [35]:

```
%Побудова графіка функції  $y=x_1^2 \cdot \sin(x_2-1)$   
%в області  $x_1 \in [-7, 3]$  та  $x_2 \in [-4.4, 1.7]$ .  
n=15;  
x1=-7:10/(n-1):3;  
x2=-4.4:6.1/(n-1):1.7;  
y=zeros(n,n);  
for j=1:n  
y(j,:)=x1.^2*sin(x2(j)-1);  
end  
surf(x1,x2,y)  
xlabel('x1')  
ylabel('x2')  
zlabel('y')  
title('Target');
```

У результаті виконання програми отримується графічне зображення, наведене на рис. 3.33 [35].

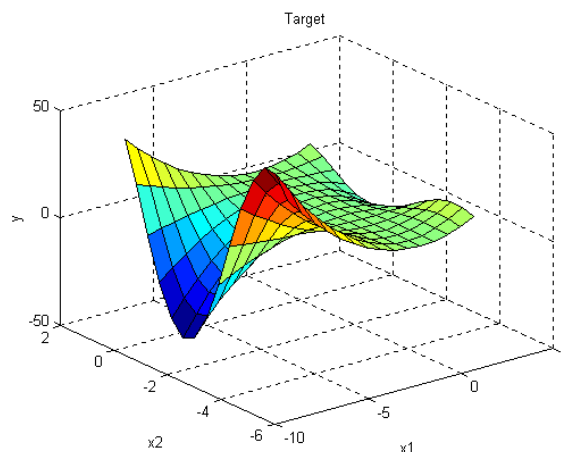


Рис. 3.33. Еталонна поверхня [35]

Проектування системи нечіткого логічного висновку, що відповідає наведеним графіком, полягає у виконанні наступної послідовності кроків [35].

Крок 1. Для завантаження основного *fis*-редактора необхідно виконати команду *fuzzy* в командному рядку. Після цього відкриється графічне вікно *fis*-редактора [35].

Крок 2. У вікні, що з'явиться додається друга вхідна змінна. Для цього в меню *Edit* вибирається команда *Add input* [35].

Крок 3. Виконується перейменування вхідних змінних. Для цього в блоці *input1*, в полі редагування імені поточної змінної вводиться позначення *x1*, а в блоці *input2* – *x2* і натискається *<Enter>* [35].

Крок 4. Виконується перейменування вихідної змінної. Для в блоці *output1*, в поле редагування імені поточної змінної, вводиться *y* і натискається *<Enter>* [35].

Крок 5. Задання імені системи. Для цього в *File*→*Export*→*To disk* вводиться ім'я файлу [35].

Крок 6. Для того, щоб перейти до редактору функції приналежності необхідно двічі натиснути лівою клавiшею миші на блоці *x1* [35].

Крок 7. Для задання діапазону зміни змінної *x1* в полі в поле *Range* ввести *[-7 3]* і натиснути *<Enter>* [35].

Крок 8. Задання функції приналежності змінної *x1*. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 3 терми з трикутними функціями приналежності. Для цього необхідно виконати *Edit*→*Add MFs ...* В результаті з'явиться діалогове вікно вибору типу і кількості функцій приналежності. За замовчуванням це 3 терми з трикутними функціями приналежності. Тому необхідно просто натиснути *<Enter>* [35].

Крок 9. Задання назв термів змінної *x1*. Для цього необхідно натиснути лівою клавiшею миші на графіку першої функції приналежності та в полі *Name* вводиться назва терму, наприклад, *Низький*, і натискається *<Enter>*. Аналогічно для інших функцій: *Середній* та *Високий* і натискається *<Enter>* [35].

Крок 10. Задання функції приналежності змінної *x2*. Для лінгвістичної оцінки цієї змінної будемо використовувати 5 термів з функціями приналежності Гауса. Для цього активується змінна *x2* за допомогою натискання лівою клавiшею миші на відповідному блоці *x2*.

Задається діапазон зміни змінної x_2 [-4.4 1.7]. Потім Edit→Add MFs. У діалоговому вікні, що з'явиться необхідно вибрати тип функції приналежності gaussmf в поле MF type і 5 термів в полі Number of MFs. Після цього натиснути <Enter> [35].

Аналогічно до кроку 9 задаються назви термів змінної x_2 : Низький, Нижче середнього, Середній, Вище середнього, Високий [35].

Крок 11. Завдання функції приналежності змінної y . Для лінгвістичної оцінки цієї змінної буде використовуватися 5 термів з трикутними функціями приналежності. Для цього необхідно активувати змінну y шляхом натискання лівою клавішею миші на блоці y . Задається діапазон зміни змінної y [-50 50] в полі Range і натискається <Enter>. Потім в меню Edit→Add MFs необхідно вибрати 5 термів в полі Number of MFs та натиснути <Enter> [35].

Аналогічно до кроку 10 задаються назви термів змінної y : Низький, Нижче середнього, Середній, Вище середнього, Високий [35].

Крок 12. Для переходу до редактора бази знань RuleEditor. Необхідно в меню вибрати Edit→ Edit rules [35].

Крок 13. На основі візуального спостереження за отриманим графіком формулюються наступні дев'ять правил [35]:

```
if (x1 is Середній) then (y is Середній);
if x1 is Низький) and (x2 is Низький) then (y is Високий);
if (x1 is Низький) and (x2 is Високий) then (y is Високий);
if (x1 is Високий) and (x2 is Високий) then (y is Вище
Середнього);
if (x1 is Високий) and (x2 is Низький) then (y is Вище
Середнього);
if (x1 is Високий) and (x2 is Середній) then (y is
Середній);
if (x1 is Низький) and (x2 is Середній) then (y is
Низький);
if (x1 is Високий) and (x2 is Вище Середнього) then (y is
Середній);
if (x1 is Високий) and (x2 is Нижче Середнього) then (y is
Середній)
```

Для введення правила необхідно вибрати в меню відповідну комбінацію термів і натиснути кнопку Add rule. У вікні Rule Editor, число наведене в дужках в кінці кожного правила є ваговим коефіцієнт цього правила. Наприклад [35]:

```
if (x1 is Середній) then (y is Середній) [1]
```

Крок 14. Для збереження створеної системи необхідно в меню File→Export→To disk [35].

На рис. 3.34 приведено вікно візуалізації нечіткого логічного висновку. Це вікно активізується командою View rules ... меню View. В поле Input вказуються значення вхідних змінних, для яких виконується логічний висновок.

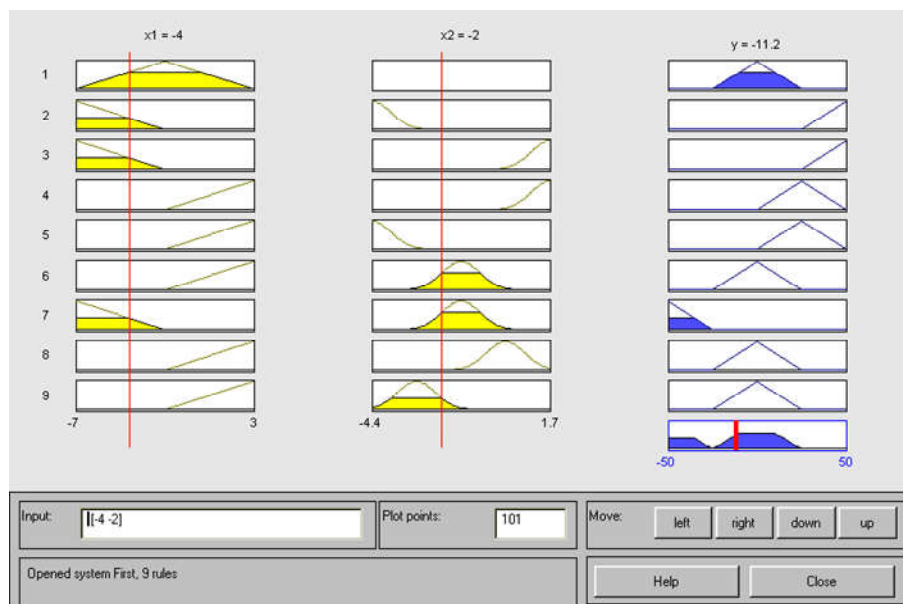


Рис 3.34. Візуалізація нечіткого логічного виводу в RuleViewer [35]

Для перегляду тримірної поверхні “входи-виходи” (рис. 3.35), що відповідає синтезованій нечіткій системі необхідно виконати View→View surface.

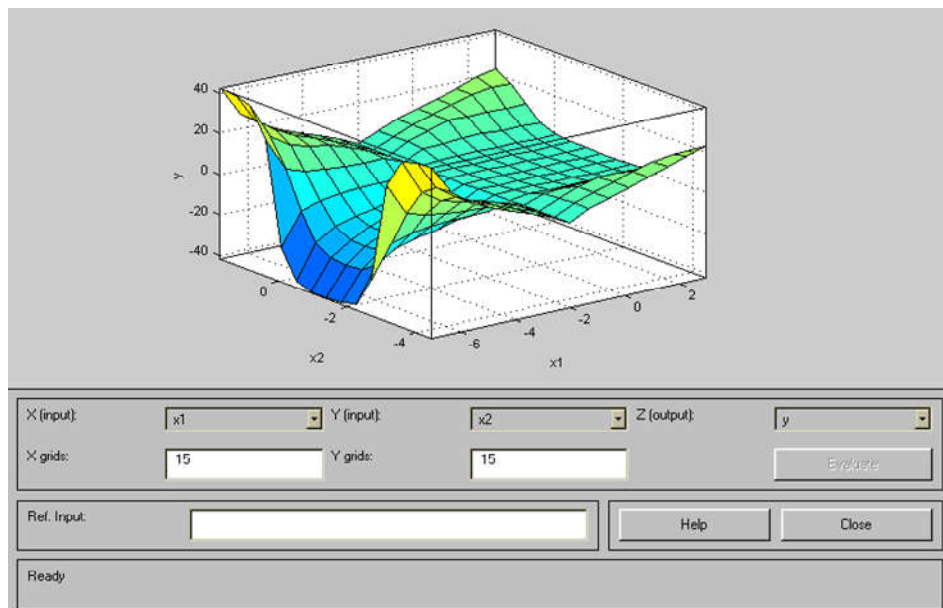


Рис. 3.36. Тримірна поверхня “входи-виходи” у вікні SurfaceViewer [Ошибка!

Источник ссылки не найден.]

Порівнюючи поверхні на рис. 3.35 і на рис. 3.36 можна дійти висновку, що складені нечіткі правила досить точно описують складну нелінійну залежність. Це підтверджує можливість використання апарату Fuzzy Logic для розв’язання чітких прикладних задач [35].



Приклад
практичного
застосування
технології fuzzy
logic

Приклад практичного застосування технології fuzzy logic для керування подачею палива інжекторного двигуна детально описано у статті [33] та підручнику [35].

Інтелектуальне керування енергетичними режимами транспортних засобів технологією fuzzy logic є одним із пріоритетних напрямів сучасного автомобілебудування. Це реалізовано на багатьох моделях сучасних автомобілів, наприклад, автомобілів таких корпорацій як Mitsubishi, Nissan, Honda, General Motors тощо. Так технологією fuzzy logic використовують для керування двигунами, трансмісією, гальмівними системами тощо. Наприклад, запатентована низка рішень керування

подачею палива у двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) з використанням нечіткої логіки. Більшість з них є розробками США та Японії. Прикладом вказаного може виступати нечіткий контролер для розрахунку базової тривалості вприскування палива (пат. № 5524599) США [31] (рис. 3.34). В якості вхідних даних, розробники використовують сигнали від датчика положення дросельної заслінки, датчика швидкості автомобіля, а також датчика кисню.

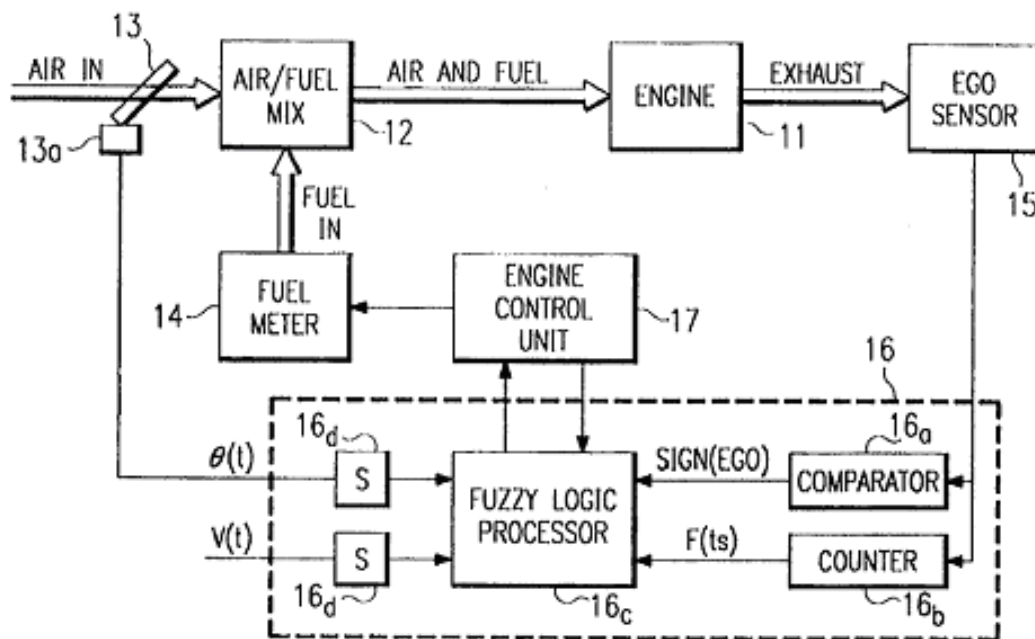


Рис. 3.34. Структурна схема системи керування подачею палива ДВЗ на основі нечіткого контролера [31]

Також відомі інші системи керування ДВЗ на основі нечіткої логіки [32, 33], що працюють за різними принципами із використанням даної технології. Так вхідними даними для автоматизованої системи [33], що приведена на рис. 3.35 є чотири сигнали: масова витрата повітря, напруга акумуляторної батареї, температура охолоджуючої рідини та сигнал датчика положення колінчастого валу.



Рис.3.35. Логічна структура системи керування ДВЗ на основі нечіткої логіки [33]

Особливістю системи інтелектуального керування подачею палива інжекторного двигуна [33], яка приведена на рис. 3.36 є те, що вона дозволяє в автоматизованому режимі керувати складом паливо-повітряної суміші в режимі реального часу та з високою точністю забезпечуючи її стехіометричний склад (тобто 14,7 частинок повітря на 1 частину палива) і як наслідок зменшити витрату палива та рівень шкідливих викидів відпрацьованих газів.

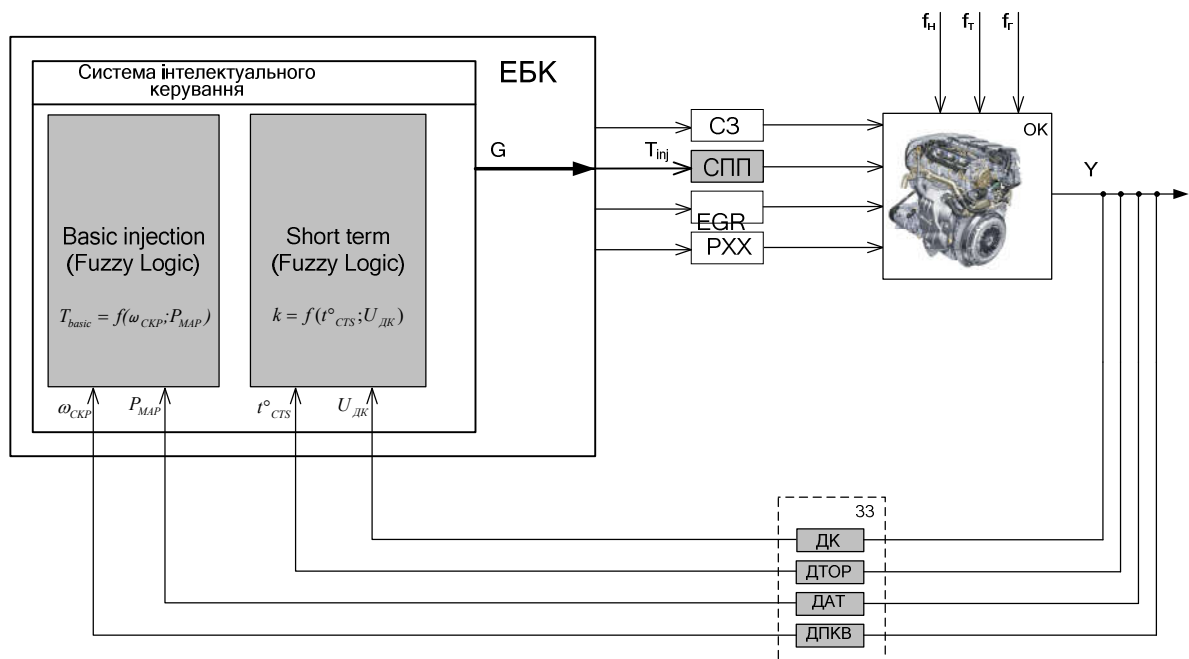


Рис. 3.36. Структурна схема системи інтелектуального керування подачею палива інжекторного двигуна [33]

Величина корекції кількості палива, що подається в циліндри за сигналом від датчику кисню (ДК), залежить від різних факторів. Зміна базової тривалості вприскування T_{basic} здійснюється в електронному блоці

керування (ЕБК), в який інтегрована система інтелектуального керування, відбувається за нечіткими правилами. Зменшуючи або збільшуючи базовий час впорскування T_{basic} палива в межах допустимого, ЕБК перевіряє сигнал від ДК, що вказує на склад паливно-повітряної суміші та встановлює нове значення цього параметра. Якщо паливно-повітряна суміш багатша, ніж стехіометрична, тобто вміст кисню у відпрацьованих газах (ВГ) низький, то, вихідна напруга ДК, буде знаходитись в інтервалі значень 0,7...0,9 В, що буде відповідати багатій паливно-повітряній суміші. В такому випадку на вхід ЕБК буде поступати сигнал "багата суміш". Відповідно за цим сигналом ЕБК зменшує час відкритого стану форсунки, внаслідок чого паливна суміш буде збіднюватися, тобто буде збільшуватись кількість кисню. Коли паливно-повітряне співвідношення зміниться і суміш стане біднішою, ніж стехіометрична, то вміст кисню у ВГ збільшується, і вихідна напруга ДК буде знаходитись в інтервалі значень 0,3...0,1 В, що відповідає бідній паливно-повітряній суміші. Тоді сигнал "бідна суміш" надходить до ЕБК і час відкриття форсунки збільшується. Весь цикл роботи модулів Basic injection та Short term безперервно повторюється, і склад суміші постійно коливається між збідненими і збагаченими станами. Це дозволяє постійно підтримувати стехіометричний склад паливно-повітряної суміші [33, 35].

ЕБК за сигналами від датчиків контролю, що можуть розглядатись як зворотній зв'язок (ЗЗ), здійснює керування системою запалення (СЗ), системою рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), регулятором холостого ходу (РХХ) та безпосередньо системою подачею палива (СПП) для впорскування палива у камеру згорання ДВЗ. В якості ЗЗ використовуються ДК, ДТОР, ДАТ, ДПКВ. При цьому враховуються різні впливи збурення, що діють на ДВЗ я які пов'язані із конструкцією самого двигуна та виникають в процесі його експлуатації: f_n – зміни навантажень на двигун, f_m – зміна температури зовнішнього середовища, f_z – зміни характеру горіння суміші в циліндрах [33, 35].

Відомо, що зменшення концентрації найбільш токсичного газу – чадного (СО) при роботі інжекторного двигуна внутрішнього згорання

(ДВЗ) пов'язане зі збідненням паливної суміші, а згоряння чадного газу в нейтралізаторі ВГ найбільш ефективно відбувається при так званій “нормальній суміші”, що відповідає оптимальному співвідношенню між кількістю палива та повітря, що повинно становити 14,7:1. Вказане називають стехіометричним складом паливно-повітряної суміші (рис. 3.37).

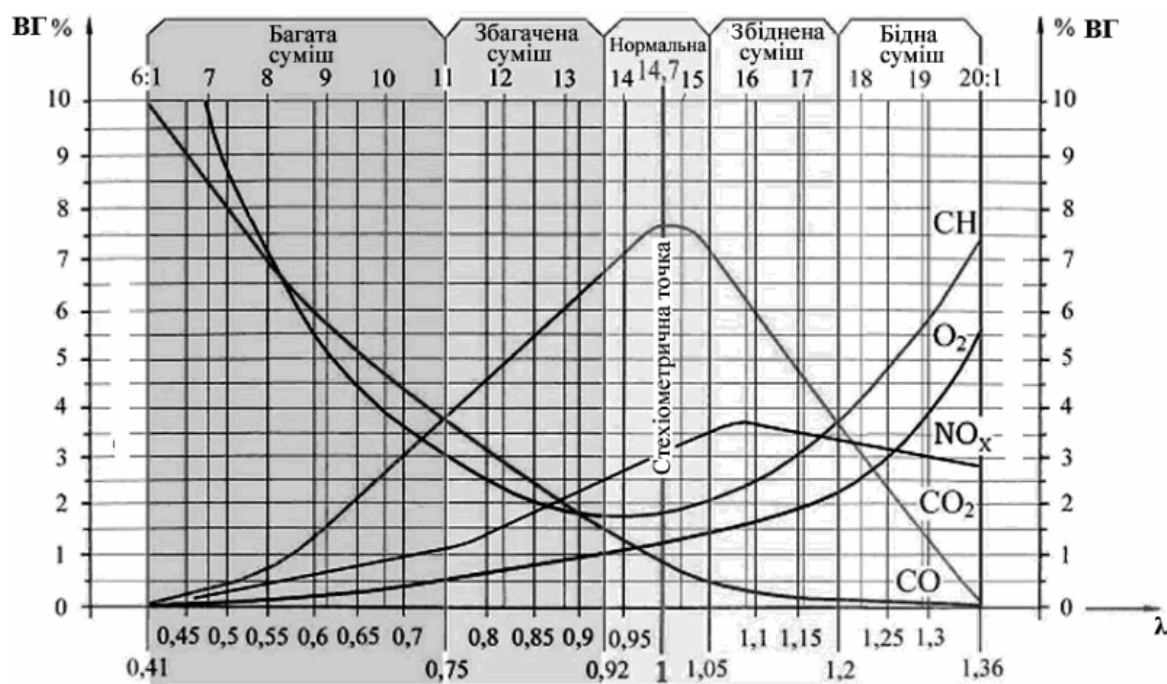


Рис. 3.37. Вміст відпрацьованих газів бензинового ДВЗ [61]

Відношення кількості повітря до кількості палива, яке надходить в циліндри ДВЗ, характеризують показником λ , значення якого при стехіометричному складі паливно-повітряної суміш становить $\lambda = 1$ [33, 61]. При цьому суміш в циліндрах ДВЗ називають "нормальною", а співвідношення кількості палива та повітря є оптимальним та становить 14,7:1 відповідно. При цьому завдання керування дозуванням подачею палива у ДВЗ здійснюється в двох режимах – холостого ходу та навантаження і полягає у підтримці постійними значень вказаних параметрів тобто $\lambda = 1$, співвідношення кількості палива та повітря становить 14,7:1 відповідно, склад паливно-повітряної суміші є стехіометричним. В цілому завдання керування подачею палива є задачею оптимізації, що передбачає формування системою керування подачею

палива (СКПП) деякого управлінського впливу $G(t)$ з метою утримання постійними значень вказаних параметрів, тобто співвідношення між кількістю повітря y_1 та кількістю палива y_2 у паливній суміші при постійній зміні температурних умов і навантаженні на двигун [33]:

$$G(t) : (Ft) = (y_1 : y_2) \rightarrow opt ,$$

де y_1 – кількість повітря у паливній суміші; y_2 – кількість палива у паливній суміші [33].

Управління G полягає у керуванні часом вприскування або базовою тривалістю вприскування T_{basic} та так званим коефіцієнтом корекції вприскування або паливоподачі k . Тобто управління здійснюється за двома каналами зв'язку. В результаті такого поділу СКПП може бути спрощено представлена класичною схемою організації управління, що застосовується в динамічних системах зі зворотнім зв'язком по стану (рис. 3.38) [33].

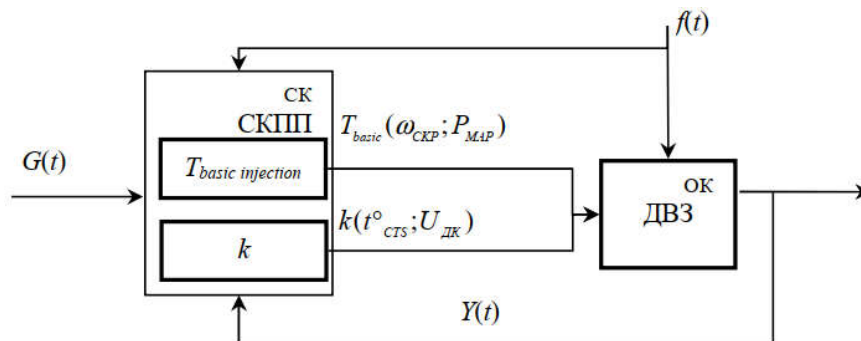


Рис. 3.38. Спрощена схема керування подачею палива у ДВЗ:

$G(t)$ – управлінський вплив; $Y(t)$ – сигнал зворотного зв'язку; $f(t)$ – збурюючі фактори; T_{basic} – тривалість вприскування; k – коефіцієнт корекції вприскування

Час базової тривалості вприскування T_{basic} функціонально залежить від частоти обертання колінчастого валу ДВЗ $\omega_{СКР}$ та абсолютного тиску $P_{МАР}$ у впускному колекторі ДВЗ [33]:

$$T_{basic} = f(\omega_{СКР}; P_{МАР}),$$

де T_{basic} – базова тривалість впорскування палива, мс; ω_{CKP} – частота обертання колінчастого валу ДВЗ, об./хв.; P_{MAP} – абсолютний тиск у впускному колекторі, кПа [33].

Коефіцієнт корекції паливоподачі k залежить від температури охолоджуючої рідини t°_{CTS} у ДВЗ та напруги датчика кисню $U_{ДК}$, який визначає вміст кисню у паливній суміші [33]:

$$k = f(t^{\circ}_{CTS}; U_{ДК}),$$

де k – коефіцієнт корекції паливоподачі, %; t°_{CTS} – температура охолоджуючої рідини, $t^{\circ}C$; $U_{ДК}$ – напруга з датчика кисню, В [33].

Відповідно до вище наведених функціональних залежностей вхідні дані можна представити відповідними множинами. Так частота обертання колінчастого валу ω_{CKP} змінюється в інтервалі від 0 до n об./хв. Тоді інтервали частот обертання колінчастого валу можна представити множиною різних режимів роботи ДВЗ наступним чином [33]:

$$\omega_{CKP} = \{\omega^j_{CKP} | j = \overline{1;3}\} = \{\omega^1_{CKP}; \omega^2_{CKP}; \omega^3_{CKP}\},$$

де ω^1_{CKP} – режим низьких обертів (low speed) валу ДВЗ; ω^2_{CKP} – режим середніх обертів (med speed) валу ДВЗ; ω^3_{CKP} – режим високих обертів (high speed) валу ДВЗ [33].

Абсолютний тиск в колекторі P_{MAP} змінюється в інтервалі від 0 до p кПа. Відповідно інтервал тисків роботи ДВЗ можна представити множиною [33]:

$$P_{MAP} = \{P^i_{MAP} | i = \overline{1;4}\} = \{P^1_{MAP}; P^2_{MAP}; P^3_{MAP}; P^4_{MAP}\},$$

де P^1_{MAP} – режим дуже низького тиску (very low pressure) роботи ДВЗ; P^2_{MAP} – режим низького тиску (low pressure) роботи ДВЗ; P^3_{MAP} – режим

високого тиску (high pressure) роботи ДВЗ; P^4_{MAP} – режим дуже високого тиску (very high pressure) роботи ДВЗ [33].

Температура охолоджуючої рідини t°_{CTS} у ДВЗ змінюється від $-t$ до $+t$, тоді інтервал температур охолоджуючої рідини може бути представлений наступною множиною [33]:

$$t^{\circ}_{CTS} = \{t^{\circ z}_{CTS} \mid z = \overline{1;3}\} = \{t^{\circ 1}_{CTS}; t^{\circ 2}_{CTS}; t^{\circ 3}_{CTS}\},$$

де $t^{\circ 1}_{CTS}$ – холодний ДВЗ (cold); $t^{\circ 2}_{CTS}$ – теплий ДВЗ (warm); $t^{\circ 3}_{CTS}$ – гарячий ДВЗ (hot) [33].

Напруга датчика кисню $U_{ДК}$ при статичних режимах роботи ДВЗ, як правило, для всіх ДВЗ змінюється в інтервалі від 0,1 до 0,9 В, що може бути представлено наступною множиною [33]:

$$U_{ДК} = \{U^r_{ДК} \mid r = \overline{1;5}\} = \{U^1_{ДК}; U^2_{ДК}; U^3_{ДК}; U^4_{ДК}; U^5_{ДК}\},$$

де $U^1_{ДК}$ – напруга з датчика кисню при бідній паливно-повітряній суміші (very lean mixture), В; $U^2_{ДК}$ – напруга з датчика кисню при збідненій паливно-повітряній суміші (lean mixture), В; $U^3_{ДК}$ – напруга з датчика кисню при нормальній паливно-повітряній суміші (optimal mix), В; $U^4_{ДК}$ – напруга з датчика кисню при збагаченій паливно-повітряній суміші (rich mixture), В; $U^5_{ДК}$ – напруга з датчика кисню при багатій паливно-повітряній суміші (very rich mixture), В [33] (рис. 3.37) .

Залежно від різних режимів роботи ДВЗ, його температури, складу паливно-повітряної суміші тощо для керування базовою тривалістю впорскування T_{basic} та коефіцієнтом корекції впорскування k сформовані відповідні множини керуючих правил або альтернатив для керування базовою тривалістю впорскування T_{basic} (табл. 3.6) та керування коефіцієнтом корекції впорскування k [33] (табл. 3.7).

Таблиця 3.6

Нечіткі правила керування базовою тривалістю впрыскування

 T^{basic} [33]

№ з/п	Правило	Опис
1	$T^1_{basic} = \{\omega^1_{CKP}; P^1_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на низьких обертах та з дуже низьким тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^1_{basic}
2	$T^2_{basic} = \{\omega^1_{CKP}; P^2_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на низьких обертах та з низьким тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^2_{basic}
3	$T^3_{basic} = \{\omega^1_{CKP}; P^3_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на низьких обертах та з високим тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^3_{basic}
4	$T^4_{basic} = \{\omega^1_{CKP}; P^4_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на низьких обертах та з дуже високим тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^4_{basic}
5	$T^5_{basic} = \{\omega^2_{CKP}; P^1_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на середніх обертах та з дуже низьким тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^5_{basic}
6	$T^6_{basic} = \{\omega^2_{CKP}; P^2_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на середніх обертах та з низьким тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^6_{basic}
7	$T^7_{basic} = \{\omega^2_{CKP}; P^3_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на середніх обертах та з високим тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^7_{basic}
8	$T^8_{basic} = \{\omega^2_{CKP}; P^4_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на середніх обертах та з дуже високим тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^8_{basic}
9	$T^9_{basic} = \{\omega^3_{CKP}; P^1_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на високих обертах та з дуже низьким тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^9_{basic}
10	$T^{10}_{basic} = \{\omega^3_{CKP}; P^2_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на високих обертах та з низьким тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^{10}_{basic}
11	$T^{11}_{basic} = \{\omega^3_{CKP}; P^3_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на високих обертах та з високим тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^{11}_{basic}
12	$T^{12}_{basic} = \{\omega^3_{CKP}; P^4_{MAP}\}$	якщо ДВЗ працює на високих обертах та з дуже високим тиском у впускному колекторі, то час впрыскування T^{12}_{basic}
Примітка: значення базової тривалості впрыскування T^{basic} (рис. 3) є величиною, що безперервно змінюється в інтервалі значень від 0 до 3 мс залежно від частоти обертання колінчатого валу ДВЗ та тиску в колекторі		

Таблиця 3.7

Нечіткі правила керування коефіцієнтом корекції впорскування k [33]

№ з/п	Правило	Опис
1	$k^1 = \{t^{o1}_{CTS}; U^1_{ДК}\}$	якщо ДВЗ холодний, а паливно-повітряна суміш бідна, то коефіцієнт корекції впорскування k^1
2	$k^2 = \{t^{o1}_{CTS}; U^2_{ДК}\}$	якщо ДВЗ холодний, а паливно-повітряна суміш збіднена, то коефіцієнт корекції впорскування k^2
3	$k^3 = \{t^{o1}_{CTS}; U^3_{ДК}\}$	якщо ДВЗ холодний, а паливно-повітряна суміш нормальна, то коефіцієнт корекції впорскування k^3
4	$k^4 = \{t^{o1}_{CTS}; U^4_{ДК}\}$	якщо ДВЗ холодний, а паливно-повітряна суміш збагачена, то коефіцієнт корекції впорскування k^4
5	$k^5 = \{t^{o1}_{CTS}; U^5_{ДК}\}$	якщо ДВЗ холодний, а паливно-повітряна суміш багата, то коефіцієнт корекції впорскування k^5
6	$k^6 = \{t^{o1}_{CTS}; U^6_{ДК}\}$	якщо ДВЗ теплий, а паливно-повітряна суміш бідна, то коефіцієнт корекції впорскування k^6
7	$k^7 = \{t^{o2}_{CTS}; U^2_{ДК}\}$	якщо ДВЗ теплий, а паливно-повітряна суміш збіднена, то коефіцієнт корекції впорскування k^7
8	$k^8 = \{t^{o2}_{CTS}; U^3_{ДК}\}$	якщо ДВЗ теплий, а паливно-повітряна суміш нормальна, то коефіцієнт корекції впорскування k^8
9	$k^9 = \{t^{o2}_{CTS}; U^4_{ДК}\}$	якщо ДВЗ теплий, а паливно-повітряна суміш збагачена, то коефіцієнт корекції впорскування k^9
10	$k^{10} = \{t^{o2}_{CTS}; U^5_{ДК}\}$	якщо ДВЗ теплий, а паливно-повітряна суміш багата, то коефіцієнт корекції впорскування k^{10}
11	$k^{11} = \{t^{o3}_{CTS}; U^1_{ДК}\}$	якщо ДВЗ гарячий, а паливно-повітряна суміш бідна, то коефіцієнт корекції впорскування k^{11}
12	$k^{12} = \{t^{o3}_{CTS}; U^2_{ДК}\}$	якщо ДВЗ гарячий, а паливно-повітряна суміш збіднена, то коефіцієнт корекції впорскування k^{12}
13	$k^{13} = \{t^{o3}_{CTS}; U^3_{ДК}\}$	якщо ДВЗ гарячий, а паливно-повітряна суміш нормальна, то коефіцієнт корекції впорскування k^{13}
14	$k^{14} = \{t^{o3}_{CTS}; U^4_{ДК}\}$	якщо ДВЗ гарячий, а паливно-повітряна суміш збагачена, то коефіцієнт корекції впорскування k^{14}
15	$k^{15} = \{t^{o3}_{CTS}; U^5_{ДК}\}$	якщо ДВЗ гарячий, а паливно-повітряна суміш багата, то коефіцієнт корекції впорскування k^{15}

Примітка: значення коефіцієнта корекції впорскування k (рис. 3.40) є нелінійною величиною, що безперервно змінюється в інтервалі значень від -4 до 8 % від базової тривалості впорскування T_{basic} (значення T_{basic} рис. 3.39) залежно від температури ДВЗ та складу паливно-повітряної суміші

**Приклади зміни коефіцієнтів корекції впорскування k
для різних температурних режимів роботи ДВЗ**

Температурний режим роботи ДВЗ	Значення коефіцієнтів корекції впорскування k
Для <u>холодного температурного режиму</u> , що реалізується на	Температура ДВЗ відповідає t^{o1}_{CTS} – холодний ДВЗ (<i>cold</i>). При цьому співвідношення кількості палива та повітря визначене за показами датчика кисню $U_{ДК}$ може відповідати одному з 5 складів паливно-повітряної суміші, тобто паливно-повітряна суміш може бути від

початку роботи ДВЗ	бідної до багатой. Тоді значення коефіцієнта корекції вприскування k змінюється від 8 до 0 % (рис. 3.40) і може бути k^1, k^2, k^3, k^4, k^5 відповідно
-----------------------	---

Для <u>теплого температурного режиму</u> , що реалізується при прогріванні ДВЗ	Температура ДВЗ відповідає $t^{\circ 2}_{CTS}$ – теплий ДВЗ (<i>warm</i>). При цьому співвідношення кількості палива та повітря визначене за показами датчика кисню $U_{ДК}$ може відповідати одному з 5 складів паливно-повітряної суміші, тобто паливно-повітряна суміш може бути від бідної до багатой. Тоді значення коефіцієнта корекції вприскування k змінюється від 6 до -2% (рис. 3.40) і може бути $k^6, k^7, k^8, k^9, k^{10}$ відповідно
Для <u>гарячого температурного режиму</u> , що реалізується при тривалій роботі ДВЗ	Температура ДВЗ відповідає $t^{\circ 3}_{CTS}$ – гарячий ДВЗ (<i>hot</i>). При цьому співвідношення кількості палива та повітря визначене за показами датчика кисню $U_{ДК}$ може відповідати одному з 5 складів паливно-повітряної суміші, тобто паливно-повітряна суміш може бути від бідної до багатой. Тоді значення коефіцієнта корекції вприскування k змінюється від 4 до -4% (рис. 3.40) і може бути $k^{11}, k^{12}, k^{13}, k^{14}, k^{15}$ відповідно

Кінцевий розв'язок щодо керування подачею палива G у загальному вигляді представляється як сукупність локальних рішень або альтернатив щодо керування базовою тривалістю вприскування T_{basic} та коефіцієнтом корекції паливонадачі k таким чином [33]:

$$G = \{T_{basic}^m; k^s\} \mid m = \overline{1;2}; s = \overline{1;15}.$$

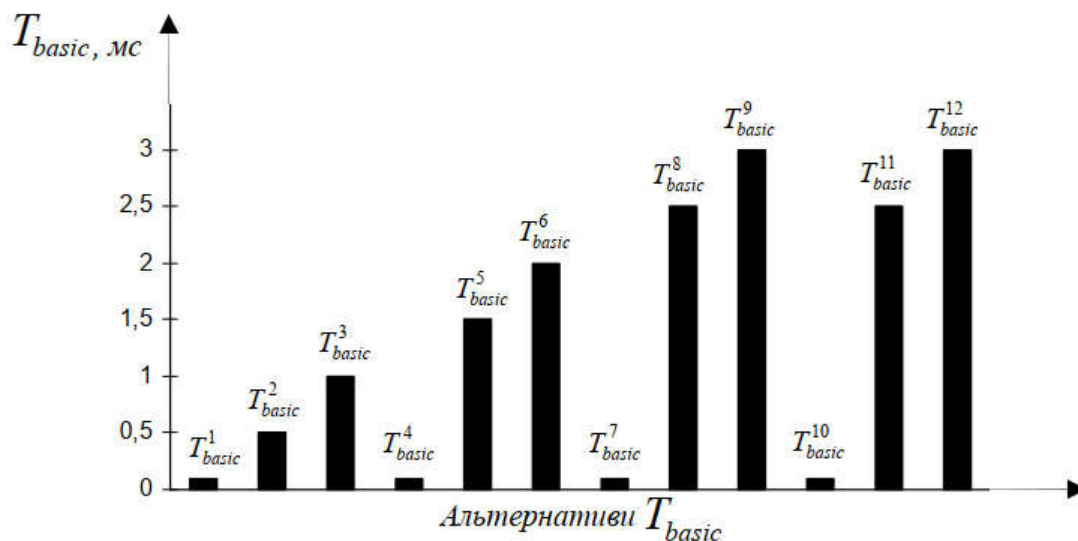


Рис. 3.39. Значення базової тривалості вприскування T_{basic} [33]

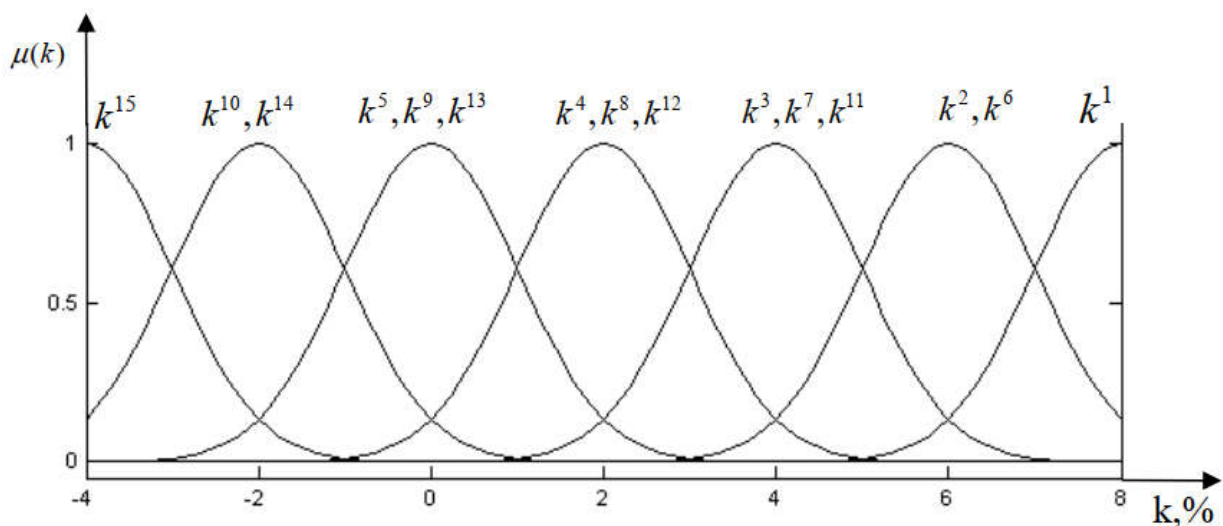


Рис. 3.40. Значення коефіцієнтів корекції вприскування k та їх функції належності $\mu(k)$ [33]

Вказане може бути реалізовано у системі інтелектуального керування подачею палива (СІКПП), структурна схема якої наведена на рис. 3.36. Очевидно, що СІКПП може бути реалізована як сукупність двох модулів. Модуль № 1 «Basic injection» використовується для керування базовою тривалістю вприскування T_{basic} . Модуль № 2 «Short term» використовується для керування коефіцієнтом корекції вприскування k . Модуль № 1 «Basic injection» та модуль № 2 «Short term» входять до складу ЕБК ДВЗ [33].

Модуль № 1 «Basic injection» використовує покази датчика положення колінчатого валу (ДПКВ) та датчика абсолютного тиску (ДАТ), виходом модуля є час відкритого стану форсунки. Модуль № 2 «Short term» використовує покази датчика кисню (ДК) та датчика температури охолоджуючої рідини (ДТОР), виходом модуля є коефіцієнт корекції паливо-повітряної суміші [33].

Кожен модуль містить базу знань з лінгвістичними змінними та нечіткими правилами, блок фазифікації, блок дефазифікації, блок рішення. Блок фазифікації перетворює чисельні входні значення в ступінь відповідності лінгвістичним змінним. Блок дефазифікації перетворює результати виведення в чисельні значення. Блок рішення виконує операції

виведення на основі існуючих нечітких правил, наданих в таблицях табл. 3.6, табл. 3.7 [33].

Імітаційна модель роботи СІКПП наведена на рис. 3.41. Модель побудована за допомогою пакета Simulink середовища MATLAB. Моделювання блоків нечіткої логіки виконано з використанням пакету розширення Fuzzy Logic Toolbox в інтерактивному режимі за допомогою графічних засобів редагування і візуалізації всіх компонентів систем нечіткої логіки [33].

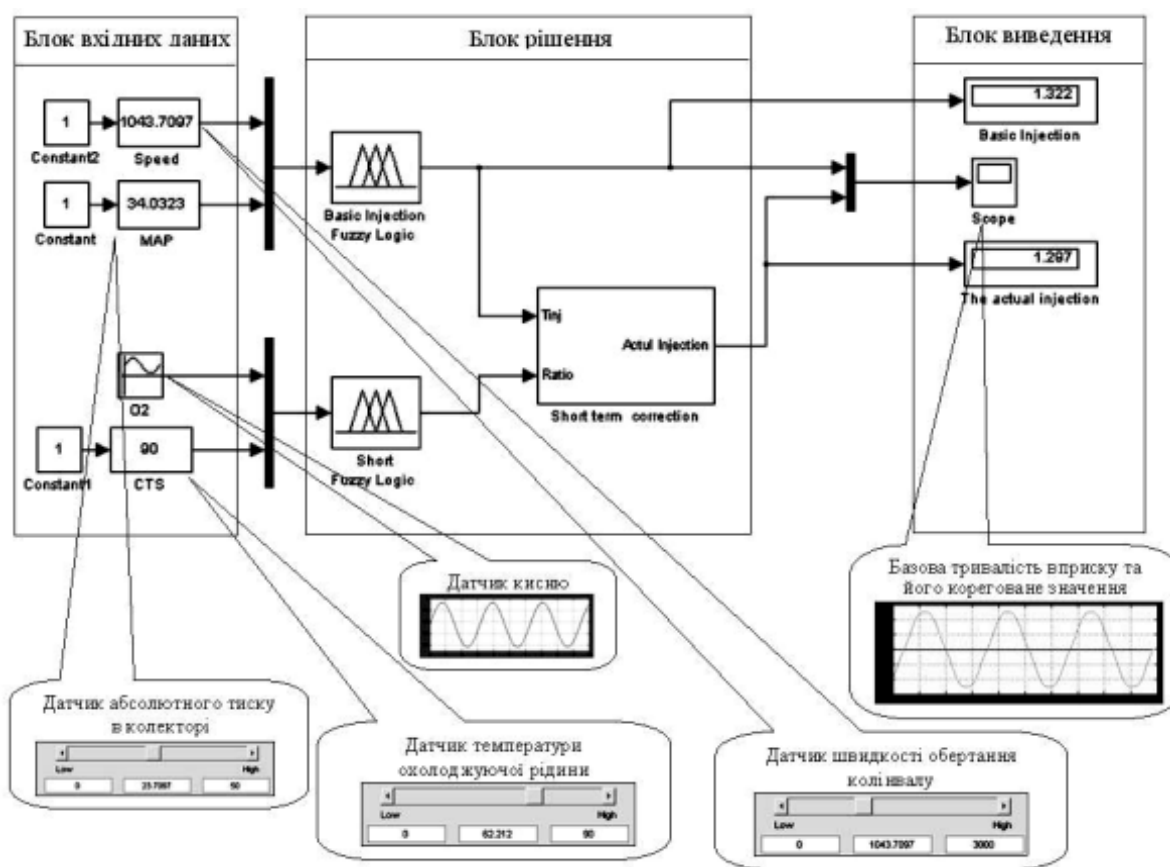


Рис. 3.41. Імітаційна модель роботи системи інтелектуального керування подачею палива [33]

Для побудови нейро-нечітких модулів було використано редактор адаптивних систем нейро-нечіткого виводу (ANFIS). Оцінка роботи модуля № 1 «Basic injection» проводилась у програмному пакеті MatLab. Базу знань модуля № 2 «Short term» було створено на основі принципу

роботи ЕБК при корекції базової тривалості вприску палива, за допомогою Fuzzy Logic Toolbox середовища MATLAB з використанням нечітких алгоритмів типу Mamdani. Оцінка роботи модуля № 2 «Short term» проводилась у програмному пакеті MatLab.

Фізичне підключення СІКПП до реального об'єкта, тобто до ДВЗ, що дає змогу перевірити працездатність даної системи в реальних умовах роботи ДВЗ, здійснюється за допомогою RTRCD модуля плати налагодження, наприклад HC12 (виробництво Німеччина), що дозволяє здійснити зв'язок між МК та ЕОМ. Спрощена структурна схема підключення системи керування до ДВЗ наведена на рис. 3.42 [33]



Рис. 3.42. Класична спрощена структурна схема підключення системи керування до ДВЗ [33]

Таким чином система інтелектуального керування подачею палива (СІКПП) на основі штучного інтелекту, зокрема fuzzy logic, дозволяє в автоматизованому режимі керувати складом паливо-повітряної суміші в режимі реального часу з високою точністю забезпечуючи її стехіометричний склад і як наслідок зменшити витрату палива та рівень шкідливих викидів ВГ [33].

3.6. Технологія генетичних обчислень

Основою головних напрямків розробки еволюційних алгоритмів та генетичних обчислень є роботи Л. Дж. Фогеля, А. Дж. Оуенса та М. Дж. Волша, які у 1966 році запропонували еволюцію простих автоматів, а також та Д. Х. Холланда, який у 1975 році запропонував схему генетичного алгоритму. На основі робіт Д. Х. Холланда Д. Гольдбергом

був описаний перший генетичний алгоритм. В подальшому генетичні алгоритми утворили методологічну основу технологій генетичних обчислень та є на сьогодні потужним засобом розв'язання різноманітних оптимізаційних задач у системному аналізі.

По своїй суті генетичний алгоритм це один із методів перебору рішень. Проте його відмітність від методу простого перебору полягає у більшій швидкості, тому що при застосуванні технології генетичних обчислень, зокрема генетичного алгоритму, перебираються тільки кращі рішення. Тобто за допомогою генетичного алгоритму обирається група рішень серед яких відшукується найкраще рішення. Після чого рішення дещо змінюється, що дозволяє отримати нові рішення, серед яких знову відбираються найкращі, а найгірші відкидаються. Таким чином, на кожному кроці роботи алгоритму відбираються найкращі рішення, припускаючи, що на наступному кроці ці рішення дадуть ще кращі рішення, тобто еволюціонують. Таким чином, можна говорити, що генетичний алгоритм працює за методом направленного перебору (рис. 3.43).

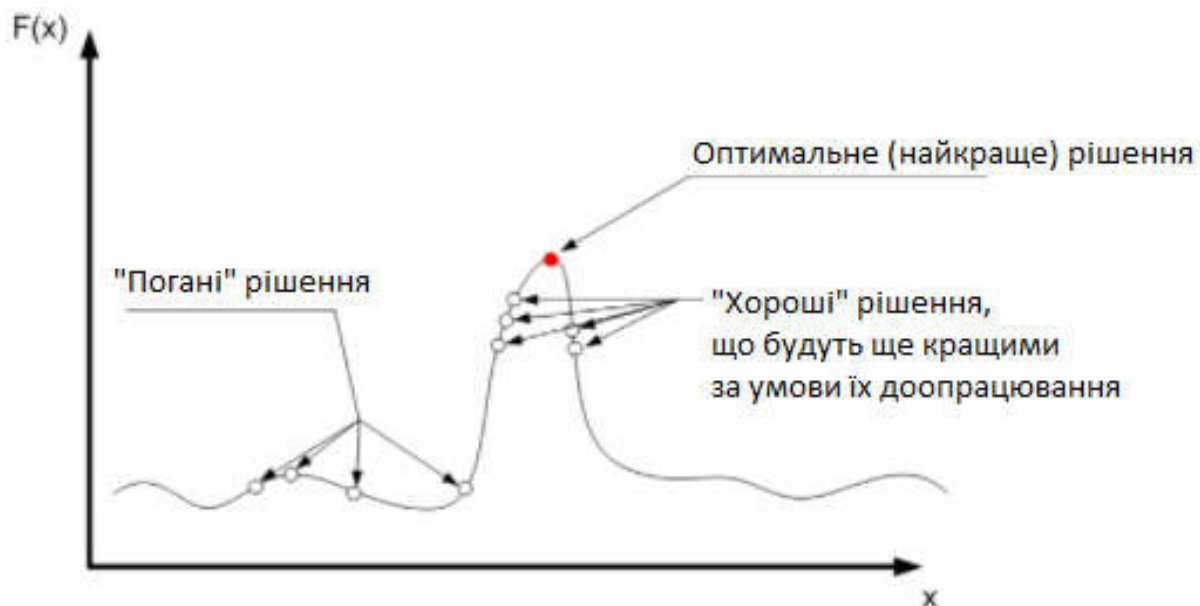


Рис. 3.43. Графічне представлення принципу роботи методу направленного перебору у генетичних алгоритмах



Генетичний алгоритм – це *евристичний* алгоритм пошуку розв’язків задач шляхом випадкового підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням методів, що є аналогічними до природного відбору у еволюції живих організмів – методів природної еволюції.

Варто підкреслити власне евристичність генетичних алгоритмів.



Евристики або **емпіричні прийоми** це такі прийоми вирішення певних завдань, які теоретично не обґрунтовані і спираються на людські знання та досвід, що застосовує людина при вирішенні різних інтелектуальних завдань, але такі що дозволяють прийняти деяке певне рішення за короткий час.

Методами природної еволюції, що використовуються у технології генетичних обчислень є:



– **успадкування** – передача генетичної інформації (генетичних ознак) від одного покоління організмів до іншого;

– **мутації** – стійка (тобто така, що може бути успадкована нащадками) зміна сукупності спадкового матеріалу, яку називають геномом;

– **відбір** – у результаті дії якого у популяції збільшується кількість особин, що володіють більш високою “живучестю”, тобто пристосованістю (мають більше сприятливих характеристик або ознак), в той час як кількість особин з меншою “живучестю”, тобто з несприятливими ознаками зменшується;

– **кросинговер** – процес обміну ділянками схожих хромосом під час їх попарного тимчасового зближення у першій фазі непрямого ділення із зменшенням кількості хромосом.

– **схрещування**, що аналогічно до **рекомбінації** у живій природі, яка полягає в розриві і “переклеюванні” батьківських

хромосом реалізує операцію рекомбінації розв'язків-кандидатів.

Варто вказати, що змінні які характеризують рішення прийнято називати *хромосомами* з *генами*. Кінцеву множину рішень, за аналогією із генетикою, називають *популяцією*.

Узагальнено принцип роботи генетичних алгоритмів полягає в тому, що множина даних обробляється за принципами генетики, тобто відбувається кодування даних, що представляються у вигляді послідовності бітів. Потім відбувається перестановка значень бітів із використанням певних операторів (схрещування, мутації та ін.). В результаті генерується множина можливих рішень (популяція) задачі. Нові рішення являють собою різноманітні комбінації частин рішень популяції. Нові рішення позиціонуються у популяції у відповідності до їх “живучесті” тобто розташування на поверхні цільової функції задачі. Для цього використовується такий оператор як *відбір*.

Узагальнена блок-схема роботи генетичного алгоритму наведена на рис. 3.44. Деяким, звичайно випадковим, чином створюється множина генотипів початкової популяції (блок 1).

Кожний генотип оцінюється з використанням “функції пристосованості або придатності”, в результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення “пристосованість / придатність”, що визначає наскільки добре він вирішує поставлене завдання (блок 2).



Рис. 3.44. Узагальнена блок-схема роботи генетичного алгоритму

З отриманої множини рішень з урахуванням значення “пристосованості / придатності” вибираються рішення (зазвичай кращі особи мають більшу ймовірність бути обраними), до яких застосовуються “генетичні оператори”, зокрема, “схрещування” – *crossover* (блок 4) і “мутація” – *mutation* (блок 5). У результаті чого, за аналогією із біологічними еволюційними термінами, формується популяція нащадків, тобто отримуються нові рішення (блок 6). Для них також обчислюється значення пристосованості / придатності (блок 7), і проводиться відбір або за аналогією із біологічною еволюцією “селекція” кращих рішень в наступне покоління (блок 9).

Наведена послідовність дій повторюється ітеративно, відтворюючи “еволюційний процес”, що триває в природі декілька життєвих циклів / поколінь, поки не буде виконано зупинку (переривання)

виконання алгоритму у відповідності до наперед заданої умови (критерію.). Таким критерієм може бути:

- винайдення деякого умовно-оптимального рішення;
- виконання певної кількості ітерацій (проходження певної кількості життєвих циклів / поколінь);
- закінчення часу, відпущеного на еволюцію.

Принципи кодування ознак об'єктів при генетичних обчисленнях

При побудові генетичних алгоритмів попередньо виконують кодування вихідних даних, які називають *хромосомами* та *генами* (рис. 3.45).

Ознака 1	Хромосома_1	000000000
Ознака 2	Хромосома_2	111111111

Рис. 3.45

Найбільш розповсюдженим є подання інформації про об'єкт у вигляді бітових рядків. При цьому кожній ознаці об'єкта відповідає один бітовий рядок, що називають *геном*. Цей рядок як правило має фіксовану довжину.

Кодування цілих чисел. Найбільш простим варіантом кодування інформації про об'єкт, що описується цілими числами, це застосування коду Грея (табл. 3.1).

Кодування дійсних чисел. У цьому випадку використовують бітове представлення числа або наступну послідовність дій:

1. Розбивають весь інтервал допустимих значень ознаки на ділянки.
2. Приймають значення гена як ціле число, що визначає номер інтервалу (для цього використовують код Грея).
3. У якості значення параметра приймають число, що є серединою цього інтервалу.

Кодування ознак представлених не в кількісній формі. У цьому випадку ознаки об'єкта представляються у числовій формі.

Код Грея

Десяткове число	Двійкове число	Код Грея
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0010
3	0011	0011
4	0100	0100
5	0101	0101
6	0110	0110
7	0111	0111
8	1000	1000
9	1001	1001
10	1010	1010
11	1011	1011
12	1100	1100
13	1101	1101
14	1110	1110
15	1111	1111

Основні оператори генетичних алгоритмів

Основними операторами генетичних алгоритмів в технології генетичних обчислень є:

- кросинговер або схрещування – *crossover* (блок 4, рис. 3.44). з популяції вибираються дві особи, які будуть батьками;
- мутація – *mutation* (блок 5, рис. 3.44);
- інверсія.

Принципи роботи оператора кросинговер / схрещування / *crossover*

1. Випадковим чином із популяції вибираються дві батьківські особи, наприклад:

Хромосома_1 0000000000

Хромосома_2 1111111111

2. Випадковим чином визначається точка розриву, наприклад, розрив відбувся після 3-го біта хромосоми:

Хромосома_1 000 0000000

Хромосома_2 111 1111111

3. Визначається нащадок як перехрещування (конкатенація) частини першого та другого батьків, наприклад:

Хромосома_1 000 0000000 ⇒ 0001111111 Результуюча_хромосома_1

Хромосома_2 111 1111111 ⇒ 1110000000 Результуюча_хромосома_2

4. З ймовірністю 0,5 одна з результуючих хромосом визначається як нащадок.

Часто на практиці при застосуванні даного оператора визначається декілька точок розриву, а не одна.

Принципи роботи оператора

мутація / *mutation*

При використанні даного оператора кожен біт у хромосомі з певною ймовірністю інвертується, наприклад,

Результуюча_хромосома_1 0001111111 ⇒ 1110001010

Як правило, ймовірність мутації приймається рівною 1%. Саме тому, в деяких випадках при застосуванні оператора мутації інвертується лише один біт хромосоми, що обирається випадковим чином.

Принципи роботи оператора *інверсія*

При застосуванні даного оператора хромосома ділиться на дві частини, які змінюються місцями, наприклад:

1110001010 ⇒ 1110 001010 ⇒ 0010101110

Детальний опис роботи генетичного алгоритму

Функціонування генетичного алгоритму це багато ітераційний процес. Кожна ітерація здійснюється за 10 кроків, що виконуються у певній послідовності та детально описані у літературі [58]. Зокрема здійснюється наступне:

1. Ініціюється початковий час $t = 0$. Випадковим чином формується початкова популяція, що складається з k особин $B_0 = A_1, A_2, \dots, A_k$.
2. Обчислюється пристосованість кожної особини $F_{A_i} = fit(A_i)$, $i = 1 \dots k$ та популяції у цілому $F_t = fit(B_t)$. Значення цієї функції визначає наскільки добре підходить особина, що описана даною хромосомою, для вирішення даної задачі.
3. Вибирається найбільш пристосована особина A_c з популяції $A_c = Get(B_t)$.
4. Проводиться кросингвер. Для цього з певною ймовірністю (ймовірністю кросингверу P_c) вибирають другу особину з популяції $A_{c1} = Get(B_t)$ і проводять кросингвер (crossover) $A_c = crossing(A_c, A_{c1})$.
5. Виконується мутація. Для цього з певною ймовірністю (ймовірністю мутації P_m) виконується оператор мутації $A_c = mutation(A_c)$.
6. Виконується інверсія. Для цього з певною ймовірністю (ймовірністю інверсії P_i) виконується оператор інверсії $A_c = inversion(A_c)$.
7. Селекція та утворення нової популяції: $insert(B_{t+1}, A_c)$.
8. Повтор операцій k разів починаючи з кроку 3.
9. Збільшується номер поточної епохи $t = t + 1$.
10. Зупинка алгоритму при виконанні умови зупинки, або в іншому випадку перехід на крок 2.

Для успішного функціонування алгоритму особливої уваги потребує етап відбору батьківських хромосом, що виконується на 3 і 4 кроках.

Відбір батьківських хромосом здійснюється різними методами:

- *рулетки* при якому можливість вибору хромосоми визначається її пристосованістю, тобто $P_{GetAi} = Fit(A_i) / Fit(B_i)$. Даний метод забезпечує високу ймовірність передачі ознак пристосованості від більш пристосованих осіб до нащадків [58];

- *турнірного відбору* при якому із популяції випадковим чином вибирається декілька особин (як правило 2 особи) із яких в якості переможця обирається особина з найбільшою пристосованістю [58];

- *стратегії елітизму* при якій особини з найбільшою пристосованістю гарантовано утворюють нову популяцію. Використання елітизму зазвичай дозволяє прискорити збіжність генетичного алгоритму, проте є досить висока ймовірність досягти локального а не глобального мінімуму [58].



Приклад

Промисловому роботу (ПР) необхідно обслужити шість одиниць основного технологічного обладнання ($OTO_i \mid i = \overline{1;6}$), наприклад, токарних верстатів, за найменший час (рис. 3.18, а). Відстань від кожної ОТО задано у вигляді матриці відстаней (рис. 3.18, б). Розв’язком задачі буде оптимальна послідовність обходу всіх OTO_i .

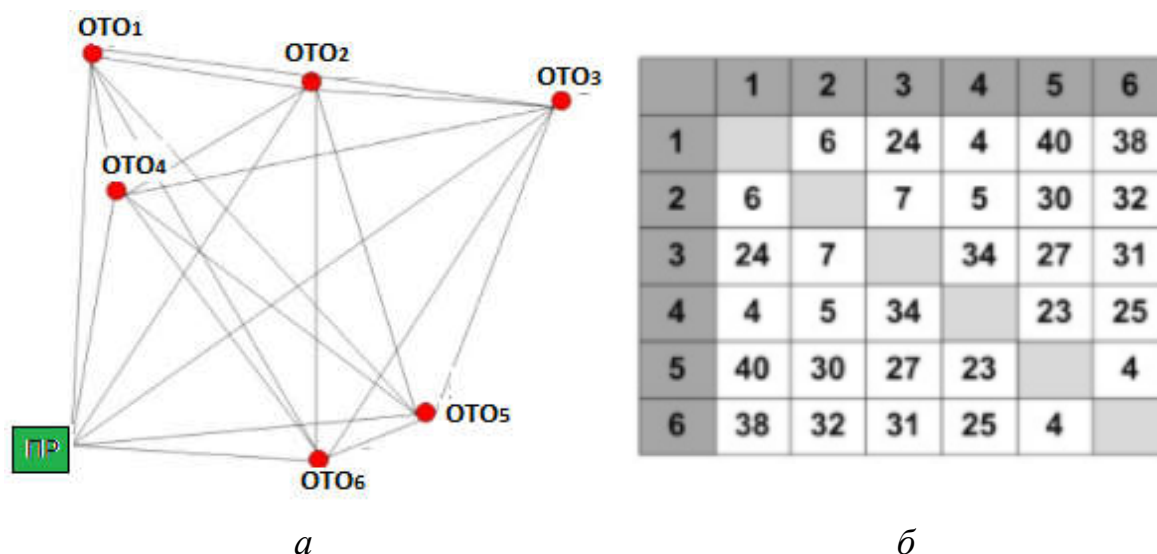


Рис. 3.46

Генетичний алгоритм розв'язку даної задачі може бути представлений наступним чином:

1. Випадковим чином формується початкова популяція. Для цього візьмемо декілька можливих рішень – особин:

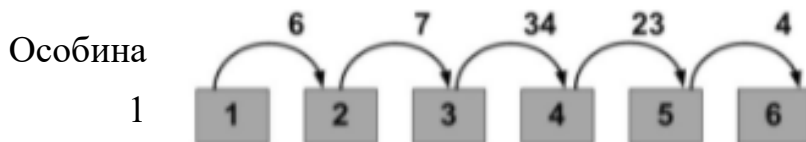


2. Обчислюється пристосованість кожної особини $F_{Ai} = fit(A_i), i = 1 \dots k$, тобто функція, що визначає наскільки добре підходить кожна особина – сума відстаней від ОТО до ОТО у вибраному маршруті:

$$F = \sum_{i=1}^6 S(OTO_i) = (S(OTO_1) + S(OTO_2) + S(OTO_3) + S(OTO_4) + S(OTO_5) + S(OTO_6)) \rightarrow \min,$$

де $S(OTO_i)$ – відстань між одиницями ОТО при відповідному переході згідно матриці відстаней (рис. 3.18, б).

Обчислюємо функцію пристосованості F_1 для Особини 1:



$$F_1 = 6 + 7 + 34 + 23 + 4 = 74$$

Аналогічним чином обчислюємо функцію пристосованості для інших особин:

$$F_2 = 111;$$

$$F_3 = 47;$$

$$F_4 = 125.$$

Очевидно, що найкращою особиною із даної множини є Особина 3, тому, що її функція пристосованості F_3 у відповідності до умов задачі (обслужити технологічне обладнання за найменший час) має найменше значення, тобто Особина 3 має найбільшу пристосованість. Найгіршу пристосованість у даній популяції має Особина 4.

3. З популяції вибирається найбільш пристосована Особина 3.

4. Проводиться кросинговер.

5. Виконується мутація.

В результаті виконання кроків 4 та 5 даного генетичного алгоритму отримується декілька нових особин – нащадків із відповідними функціями пристосованості:

Нащадок 1	1	3	2	4	5	6	$F_1 = 63$
Нащадок 2	1	4	5	3	2	6	$F_2 = 93$
Нащадок 3	6	3	2	5	4	1	$F_3 = 95$
Нащадок 4	2	1	6	5	3	4	$F_4 = 109$

6. Селекція. Для цього із початкової популяції та популяції нащадків відкидаються найгірші особини. Залишаються батьки 1 та 3, і нащадки 1 та 2. Із цих особин формується нова популяція.

7. Виконується повторювання кроків алгоритму до виконання умови зупинки. Зупинка алгоритму може відбутися, наприклад, при настанні однієї із умов:

- сумарний шлях менше 50;
- тривалість роботи алгоритму 1 год.;
- кількість циклів алгоритму 10;
- відсутність протягом трьох поколінь особини кращих за попередні.

4. ПРАКТИКУМ

4.1. Метод експертних оцінок для визначення критеріїв вибору найкращої моделі промислового роботу при синтезі роботизованих механоскладальних технологій

У літературі [47] описується задача вибору промислових роботів (ПР) та формуванні оптимальної траєкторії переміщень його схвата (Сх). Дана задача виникає при технологічній підготовці автоматизованого виробництва на етапі вибору технологічного обладнання (ТО) і характеризується значною трудомісткістю, довготривалістю та багатоетапністю її вирішення. При цьому очевидним є вплив вказаного на якість прийняття рішень при виборі ПР та розробці оптимальних рухових траєкторій Сх ПР. Крім того, якість розробки траєкторії переміщень Сх ПР також залежить від множини різноманітних за своїм змістом та сутністю показників, одночасне зміна значень яких у бік кількісного збільшення та зменшення по різному відбивається на технічних та економічних показниках, що відображають якість впровадження та роботи ПР.

Множина різноманітних характеристик та параметрів ПР та Сх ПР, що впливають на прийняття рішень при їх виборі за своєю сутністю можуть бути згруповані, наприклад, у технічні та економічні. Кількісні та якісні значення цих характеристик та параметрів можуть бути отримані з нормативно-технічної документації та паспортних даних ПР та іншого ТО що функціонально взаємодіє з ПР, різних бухгалтерських документів організації, підприємства.

Автори [47] встановили, що технологічні можливості та конструктивні особливості ПР характеризують такі основні показники як: *швидкість переміщень Сх ПР v (м/с), кількість точок позиціонування r (шт.), величини лінійних переміщень l (м), надійність N (год.), похибка позиціонування Δ (мм), форма робочої зони V (м³), кількість ступенів рухомості маніпуляційної системи (МС) ПР n (шт.), продуктивність Q (шт./год.),*

прискорення a (м/с²), вантажопідйомність Сх ПР g (кг), маса ПР m (кг) тощо.

Швидкість переміщень Сх ПР v (м/с) узгоджують із продуктивністю, яка корелює із траєкторією переміщень об'єктів маніпулювання, витрат часу на їх переміщення тощо. Дані щодо величини швидкості вибираються із нормативно-технічної документації та паспорту на ПР [47].

Кількість точок позиціонування r (шт.) – кількість проміжних позицій, потрібних для переміщення Сх ПР з початкового місця положення в кінцеве, які залежать від метрики та структури (довжини та кількості ланок) МС ПР. Визначаються експериментально з траєкторних обмежень та ступенів рухомості ПР при формуванні траєкторій з врахуванням обмежень щодо кількості ступенів рухомості та величин переміщень кожної узагальненої координати [47].

Величина переміщень Сх ПР l (м) – відстань між проміжними позиціями ТО. Розраховується експериментально з нормативної документації при плануванні ГВС [47].

Надійність ПР N (год.) – час напрацювання до першої відмови. Даний показник визначається виробником та вказується у паспорті ПР [47].

Похибка позиціонування Δ (мм) – похибка, яка визначається вимогами щодо точності виконання основної технологічної операції або максимально можливим відхиленням деталі від базувальних поверхонь пристрою. Похибку позиціонування Сх ПР можна отримати з паспортних даних та технічної документації на ПР [47].

Об'єм робочої зони ПР V (м³) – визначається метрикою та структурою МС ПР та розраховується за паспортними даними ПР та/або з конструкторської документації [47].

Кількість ступенів рухомості МС ПР n (шт.) – визначається конструкцією МС ПР, обирається з врахуванням призначення ПР, змістом маніпуляційних дій, розмірами робочої зони і вибраною структурно-кінематичною схемою [47].

Продуктивність ПР Q (шт./год.) – кількість готових виробів, що випускаються за одиницю часу за безпосередньої участі ПР в аналізованій

технологічній структурі і залежить від швидкісних показників кожної активної системи рухомої маніпуляційної системи ПР [47].

Прискорення Сх ПР a (м/с²) – зміна швидкості переміщення Сх ПР за одиницю часу [47].

Маса ПР m (кг) – маса ПР визначається за паспортними даними [47].

Вантажопідйомність Сх ПР g (кг) – найбільше значення маси ОМ, в тому числі з масою робочого органа, які можуть переміщатися "рукою" ПР при заданих умовах [47]. Отримується із паспортних даних.

Наведені параметри складають зміст множини технічного критерію (*ТПР*), за яким проводиться вибір ПР [47]:

$$ТПР = \{v, r, l, N, \Delta, V, n, a, Q, m, g, \dots\}. \quad (4.1)$$

Очевидно, що враховуючи інші параметри та задачі ТП, ГВС тощо, зміст технічного критерію *ТПР* може бути змінений [47].

Також не можна залишати поза уваги економічні показники які мають значний вплив на якість прийняття рішень при виборі ПР. Зокрема у літературі [47] вказують на важливість *величини споживаної потужності P* (кВт/год), *собівартість ПР S* (грн.), *приведених витрат F* (грн.), *витрат, що припадають на одиницю випущеної продукції D* (грн.) тощо.

Величина споживаної потужності P (кВт/год.) – кількість енергії, яку споживає ПР при виконанні операцій ТП. Визначається паспортними даними, експлуатаційними показниками функціонування ПР та нормативно-технічною документацією на ПР [47].

Собівартість ПР S (грн.) – вартість ПР та затрати на його амортизацію та модернізацію [47].

Приведені витрати F (грн.) – економічна категорія, яка відображає величину повних витрат на виробництво [47].

Витрати, що припадають на одиницю випущеної продукції D (грн.) – відображають приведені витрати на виготовлення певної кількості продукції [47].

Приведені вище параметри, в свою чергу, можуть складати зміст множини економічного критерію (*ЕПР*), за яким проводиться вибір ПР [47:

$$ЕПР = \{P, S, F, D, \dots\}, \quad (4.2)$$

де *P* – величина споживаної потужності ПР;

S – собівартість ПР;

F – приведені витрати ПР;

D – витрати, що припадають на одиницю випущеної продукції.

Очевидно, що при зміні умов ТП, виробничих задач ГВС, стратегії розвитку підприємства, умов ринку тощо зміст економічного критерію *ЕПР* може бути доповнений іншими параметрами.

Обґрунтування змісту, значення та складу критеріїв вибору ПР методами ЕО

У даній задачі методи ЕО застосовуються для визначення впливу техніко-економічних параметрів на вибір ПР та обґрунтованого прийняття рішення.

Процес отримання ЕО є багатоетапним і описаний у п.2.5.2 даного посібника.

I етап. Визначення мети експертизи

Мета експертизи: проаналізувати ступінь впливу технічних та економічних показників та характеристик ПР на якість функціонування автоматизованих виробництв.

Таким чином необхідно проаналізувати, п'ятнадцять техніко-економічних показників ПР та визначити ступінь важливості кожного з них при виборі ПР, а також проаналізувати доцільність використання кожного показника у технічному *ТПР* та економічному *ЕПР* критеріях вибору ПР. Крім того необхідно визначити позитивність чи негативність впливу кожного із показників на якість рішення.

II етап. Формування експертної групи

Адекватність ЕО корелює з рівнем кваліфікації експертів. Тому необхідно залучити висококваліфікованих фахівців у даній предметній галузі. Так у складі експертної групи шість експертів під умовними іменами: Експерт 1; Експерт 2; Експерт 3; Експерт 4; Експерт 5; Експерт 6.

III етап. Розробка методології отримання ЕО та бланків опитувальників (анкет)

Метод експертного аналізу, що орієнтований на отримання експертних оцінок (ЕО) у кількісній та якісній формі шляхом проведення експертного опитування за наступними процедурами (методами) – метод Дельфи або мозковий штурм. Особливість організації та проведення експертного опитування на вказаних методах описано у п. 2.5.2 даного навчального посібника.

Експертне опитування застосовується для розв'язку двох локальних задач.

Задача 1. *Аналіз ступіню впливу кожного показника на рішення.* Іншими словами необхідно визначити на скільки важливим є той чи інший показник та величину його вагового коефіцієнту у технічному *ТПР* та економічному *ЕПР* критеріях при виборі ПР.

Визначення важливості показників. Аналіз та визначення важливості 15 показників виконується шкалюванням (див. п. 2.5.2 даного навчального посібника) за 15-ранговою порядковою шкалою. Найкращому на думку експерта показнику привласнюється ранг 1. Менш привабливому показнику експертом привласнюється ранг 2 і т.д. Найнижчим вважається 15 ранг, який привласнюється найгіршому за міркуванням експертів показнику. Опитувальник (анкета) ЕО для даної роботи може бути розроблена у вигляді таблиці, наприклад, табл. 4.1.

Визначення ваг показників. Кожен із показників ПР у залежності від своєї важливості наповнює певним змістом економічний *ЕПР* та технічний *ТПР* критерії вибору ПР. Саме тому кожному показнику доцільно призначити відповідне вагове значення, що буде відтворюватиме ступінь його впливу (важливості). Для цього також використовується шкалювання,

зокрема, *шкала відношення*, яка використовується для оцінювання кількісних показників множиною чисел від 0 до 1. Найбільше значення надається експертами тому показнику вага якого на прийняття рішення за міркуваннями експерта є найсуттєвішею. Єдине обмеження, яке накладається на рішення експерта полягає у тому, що сума вагових значень кожного показника, що аналізується одним експертом, не повинна бути більшою 1. Опитувальник (анкета) ЕО для даної роботи може бути розроблена у вигляді таблиці, наприклад, табл. 4.2.

Визначення позитивності чи негативності впливу показника на якість рішення. У даному випадку оцінка експертами здійснюється за бінарною номінальною шкалою: вплив позитивний “+” або вплив негативний “-”. Опитувальник (анкета) ЕО для даної роботи може бути розроблена у вигляді таблиці, наприклад, табл. 4.3

IV етап – отримання ЕО та V етап – опрацювання ЕО IV.

Виконується ретельний аналіз відповідей експертів для формуванні узагальненої ЕО. Результати визначення ступіню важливості впливу показників на прийняття рішення представлені у табл. 4.4.

Опрацювання ЕО.

У зв’язку із суб’єктивністю міркувань експертів, для отримання узагальненої ЕО множина ЕО опрацьовується методами математичної статистики. Крім того визначається ступінь узгодженості думок та рішень експертів і виявляються думки, що є суттєво відмітними від загального рішення. Кількісна оцінка ЕО здійснюється за методом середніх арифметичних рангів та методом медіан рангів

1) Отримання узагальненої ЕО

Метод середніх арифметичних рангів

1) Використовуючи формулу (2.4) розраховується середнє арифметичне рангів наданих показникам експертами.

2) Ренкінг середніх арифметичних рангів за збільшенням їх значень (див. табл. 4.4). Отриманий ренкінговий ряд має вид:

$$v < l < S < r < \Delta < n < V < F < g < N < Q < a < (m, P) < D.$$

Метод медіан рангів

- 1) Обчислюється медіана рангів ЕО, що надані показникам ПР.
- 2) Ренкінг медіан рангів за принципом зменшення. Тобто кращий показника має менший ранг. Отримані результати представлені у табл. 4.4.

Ренкінговий ряд має вид:

$$(v, l) < S < (r, \Delta) < n < V < F < g < N < Q < P < (m, a) < D.$$

Співставлення ренкінгових рядів отриманих методом медіан рангів та методом середніх арифметичних рангів вказує на їх подібність. Узагальнені ЕО за цими методами співпадають у параметрів $v, l, S, r, \Delta, n, V, F, g, N, Q$. На наявність похибок використуваних методів вказують неспівпадіння на окремих позиціях ренкінгових рядів. Значні неспівпадіння ЕО у показників P, m, a, D , але вони на думку експертів є менш впливовими при прийнятті рішень щодо вибору ПР.

У такому випадку подальше застосування показників із значним неспівпадінням узагальненої ЕО отриманої за різними методами за умови їх малої впливовості на рішення може бути взагалі недоцільним і вони можуть бути виключні із аналізованої множини показників, що і реалізовано у даній задачі.

2) **Визначення ступеню узгодженості думок експертів.** В експертному опитуванні прийняло участь шість експертів. При цьому їх оцінки різняться. Тому визначається величина різниць ЕО, адже високий ступінь узгодженості думок експертів є передумовою високої надійності загальної ЕО. Для розрахунку ступеню узгодженості думок шести експертів обчислено коефіцієнт конкордації $W = 0,87$ за формулою (2.11) (див. п. 2.5.2 даного навчального посібника), а результат розрахунку представлено у табл. 4.5. Одержане значення **0,87** є близьким до 1 що **вказує на високу ступінь узгодженості думок експертів.**

2. Отримання узагальненої ЕО вагових значень важливості показників.

1) ЕО вагових значень важливості показників (ваг) ПР оцінені за шкалою відношення та наведені у табл. 4.6. Вагові значення важливості показників розраховано за формулами (2.5) та (2.6) (див. п. 2.5.2 даного навчального посібника).

Таблиця 4.1

ЕО доцільності техніко-економічних показників у формуванні змісту технічного ТПП та економічного ЕПР критеріїв вибору ПР за 15-ранговою порядковою шкалою [47]

№ експерта	Ранги показників від 1 до 15													
	Маса ПР	Продуктивність ПР	Вантажопідйомність Сх ПР	Швидкість МС	Кількість точок позиціонування Сх ПР	Величина переміщень Сх ПР	Надійність ПР	Похибка позиціонування Сх ПР	Об'єм робочої зони ПР	Кількість ступенів випущеної МС	Прискорення МС ПР	Споживана потужність ПР	Собівартість ПР	Приведені затрати

Таблиця 4.2

ЕО важливості (пріоритетності) техніко-економічних показників у змісті технічного ТПП та економічного ЕПР критеріїв вибору ПР за шкалою відношення [47]

№ експерта	Маса ПР	Продуктивність ПР	Вантажопідйомність Сх ПР	Швидкість МС	Кількість точок позиціонування Сх ПР	Величина	Надійність ПР	Похибка	Об'єм робочої зони	Кількість ступенів	Затрати на одиницю випущеної	Прискорення МС	Споживана	Собівартість ПР	Приведені затрати	Σ вагових коефіцієнтів
																1
																1
																1

Таблиця 4.4

Вихідні дані ЕО та узагальнена ЕО важливості техніко-економічних показників
у змісті технічного ТПР та економічного ЕПР критеріїв вибору ПР [47]

№ експерта	Маса ПР	Продуктивність ПР	Вантажопідіймачність Сх ПР	Швидкість МС	Кількість точок позионування Сх ПР	Величина переміщень Сх ПР	Надійність ПР	Похилка позионування Сх	Об'єм робочої зони ПР	Кількість ступенів рухомості МС	одиноцю випущеної	Прискорення МС ПР	Сложивана потужність ПР	Собівартість ПР	Приведені затрати
	<i>m</i>	<i>Q</i>	<i>g</i>	<i>v</i>	<i>r</i>	<i>l</i>	<i>N</i>	Δ	<i>V</i>	<i>n</i>	<i>D</i>	<i>a</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>F</i>
Експерт 1	14	12	9	1	2	3	10	7	8	4	13	15	11	5	6
Експерт 2	15	13	12	2	5	1	9	4	7	6	14	10	12	3	8
Експерт 3	12	10	12	3	1	2	8	7	6	5	14	13	15	4	9
Експерт 4	10	9	8	1	7	2	12	6	5	4	14	13	15	3	11
Експерт 5	14	12	9	2	5	1	13	3	6	7	15	10	11	4	8
Експерт 6	12	11	8	2	5	4	9	3	10	6	15	14	13	1	7
Узагальнена ЕО															
Метод середніх арифметичних рангів															
Сума рангів	77	67	58	11	25	13	61	30	42	32	85	75	77	20	49
Середній арифметичний ранг	12,833	11,167	9,6667	1,8333	4,1667	2,1667	10,167	5	7	5,3333	14,167	12,5	12,833	3,3333	8,1667
Підсумковий ранг	13	11	9	1	4	2	10	5	7	6	15	12	13	3	8
Вигляд ранжованого ряду	$v < l < S < r < \Delta < n < V < F < g < N < Q < a < (m, P) < D$														
Метод медіан рангів															
Медіани рангів	13	11,5	9	2	5	2	9,5	5	6,5	5,5	14	13	12,5	3,5	8
Підсумковий ранг	13	11	9	1	4	1	10	4	7	6	15	13	12	3	8
Вигляд ранжованого ряду	$(v, l) < S < (r, \Delta) < n < V < F < g < N < Q < P < (m, a) < D$														

Таблиця 4.5

Вихідні дані ЕО, проміжкові та підсумкові результати обчислення коефіцієнта конкордації ЕО важливості техніко-економічних показників у змісті технічного T_{PP} та економічного E_{PP} критеріїв вибору PP

№ експерта	Маса PP	Продуктивність PP	Вантажопідйомність Сх PP	Швидкість МС	Кількість точок позионування Сх PP	Величина переміщень Сх PP	Надійність PP	Похибка позионування Сх	Об'єм робочої зони PP	Кількість ступенів рухомості МС	Заграти на одиницю випущеної продукції	Прискорення МС PP	Сложивана потужність PP	Собівартість PP	Приведені затрати
	m	Q	g	v	r	l	N	Δ	V	n	D	a	P	S	F
Експерт 1	14	12	9	1	2	3	10	7	8	4	13	15	11	5	6
Експерт 2	15	13	12	2	5	1	9	4	7	6	14	10	12	3	8
Експерт 3	12	10	12	3	1	2	8	7	6	5	14	13	15	4	9
Експерт 4	10	9	8	1	7	2	12	6	5	4	14	13	15	3	11
Експерт 5	14	12	9	2	5	1	13	3	6	7	15	10	11	4	8
Експерт 6	12	11	8	2	5	4	9	3	10	6	15	14	13	1	7
Сума рангів	77	67	58	11	25	13	61	30	42	32	85	75	77	20	49
Середня сума \bar{x}	48,133														
Відхилення від середньої суми $(x_j - \bar{x})$	28,8667	18,8667	9,86667	-37,133	-23,133	-35,133	12,8667	-18,133	-6,133	-16,133	36,8667	26,8667	28,8667	-28,133	0,86667
Квадрат відхилення $(x_j - \bar{x})^2$	833,284	355,951	97,3511	1378,88	535,151	1234,351	165,551	328,818	37,6178	260,284	1359,15	721,818	833,284	791,484	0,75111
Сума відхилень	8933,73														
Коефіцієнт конкордації W	0,87														

Таблиця 4.6

Вихідні дані ЕО та узагальнена ЕО вагових коефіцієнтів важливості техніко-економічних показників у змісті технічного T_{PP} та економічного E_{PP} критеріїв вибору ПР за шкалою відношення

№ експерта	Величина перемічень Сх ПР l	Вантажо-підйомність Сх ПР g	Швидкість Сх ПР v	Надійність ПР N	Похибка позионування Сх ПР Δ	Об'єм робочої зони ПР V	Кількість ступенів рухомості МС ПР n	Собівартість ПР S	Приведені затрати F	Продуктивність ПР Q	Кількість точок позионування Сх ПР r	Примітка
ЕО показників у балах: x_{ij}												\sum балів $\sum_{i=1}^n x_{ij}$
Експерт 1	7	8	9	1	2	10	11	3	4	5	6	66
Експерт 2	8	7	6	1	1	5	4	2	2	1	3	40
Експерт 3	10	11	9	2	1	8	8	3	3	1	7	63
Експерт 4	9	8	7	2	1	3	4	1	1	1	5	42
Експерт 5	11	5	6	2	1	5	6	2	3	1	4	46
Експерт 6	5	4	4	2	1	8	10	3	2	1	11	51
Вагові значення ЕО показників: $w_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$												\sum ваг
Експерт 1	0,10606	0,12121	0,13636	0,01515	0,0303	0,15152	0,16667	0,04545	0,06061	0,07576	0,09091	1
Експерт 2	0,2	0,175	0,15	0,025	0,025	0,125	0,1	0,05	0,05	0,025	0,075	1
Експерт 3	0,15873	0,1746	0,14286	0,03175	0,01587	0,12698	0,12698	0,04762	0,04762	0,01587	0,11111	1
Експерт 4	0,21429	0,19048	0,16667	0,04762	0,02381	0,07143	0,09524	0,02381	0,02381	0,02381	0,11905	1
Експерт 5	0,23913	0,1087	0,13043	0,04348	0,02174	0,1087	0,13043	0,04348	0,06522	0,02174	0,08696	1
Експерт 6	0,09804	0,07843	0,07843	0,03922	0,01961	0,15686	0,19608	0,05882	0,03922	0,01961	0,21569	1
Сума ваг $\sum_{j=1}^m w_{ij}$	1,02	0,85	0,8	0,2	0,14	0,74	0,82	0,27	0,29	0,18	0,7	–
Вага показника	0,17	0,14	0,13	0,03	0,02	0,12	0,14	0,05	0,05	0,03	0,12	1

Таблиця 4.7

Вихідні дані ЕО та узагальнена ЕО впливу (позитивного та негативного) техніко-економічних показників на значення технічного T_{PP} та економічного E_{PP} критеріїв вибору ПР за двозначною номінальною шкалою

№ експерта	Відстань переміщення Сх ПР l	Вантажопідйом ність ПР g	Швидкість Сх ПР v	Надійність ПР N	Похибка позиціонування Сх ПР Δ	Об'єм робочої зони ПР V	ступенів рухомості МС n	Собівартість ПР S	Приведені заграти F	Продуктивність ПР Q	Кількість точок позиціонування Сх ПР r
Експерт 1	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-
Експерт 2	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-
Експерт 3	-	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+
Експерт 4	-	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-
Експерт 5	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-
Експерт 6	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-
Загальна ЕО	-	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-

2) **Визначення ступеню узгодженості думок експертів** виконується аналогічно до наведеного вище. Результати розрахунків представлено у табл. 4.4 – 4.7.

Визначення позитивності та негативності впливу показника на якість прийняття рішень. ЕО позитивності чи негативності кожного із показників аналізованої множини наведено у табл. 4.6.

Отримання узагальненої ЕО здійснено аналогічно до наведеної вище процедури. Результати представлені у табл. 4.7.

VI етап – встановлення ступеню досягнення мети експертизи

Проаналізовано техніко-економічні показники ПР. Результати наведені у табл. 4.8 та табл. 4.9 є підставою змістовного представлення технічного T_{PP} та економічного E_{PP} критеріїв вибору ПР наступним чином:

$$T_{PP} = (v \cdot av; l \cdot bl; r \cdot br; \Delta \cdot b\Delta; n \cdot an; V \cdot aV; g \cdot ag; N \cdot aN; Q \cdot aQ),$$

де v – швидкість МС ПР;

l – відстань переміщень Сх ПР;

r – кількість точок позиціонування Сх ПР;

Δ – похибка позиціонування Сх ПР;

n – кількість ступенів рухомості МС ПР;

V – об'єм робочої зони ПР; g – вантажопідйомність Сх ПР;

N – надійність ПР;

Q – продуктивність ПР;

$a v; an; aV; ag; aN; aQ$ – вагові значення важливості технічних показників (вагові коефіцієнти) $a v; n; V; g; N; Q$, що мають позитивний вплив згідно із табл. 4.9;

$bl; br; b\Delta$ – вагові значення важливості технічних показників $l; r; \Delta$, що мають негативний вплив згідно із табл. 4.7.

$$E_{PP} = \{S \cdot bS; F \cdot bF\},$$

де S – собівартість ПР; F – приведені витрати; bS ; bF – вагові коефіцієнти важливості економічних показників S ; F відповідно, що мають негативний вплив відповідно до табл. 4.7. Числові значення вагових коефіцієнтів важливості показників приведені в табл. 4.4 – табл. 4.7.

4.2. Методи дослідження операцій для розв’язання однокритеріальних оптимізаційних задач

Існує ряд завдань (структуровані проблеми), для вирішення яких розроблені формальні методи їх вирішення - це методи дослідження операцій. Ці методи полягають, по-перше, в побудові математичних, економічних або статистичних моделей для вирішення задач управління в складних ситуаціях або умовах невизначеності; по-друге, у вивченні взаємозв'язків, що визначають можливі наслідки прийнятих рішень, і встановленні критеріїв ефективності, що дозволяють оцінити відносну перевагу того чи іншого варіанту дій. Під операцією мається на увазі звичайна діяльність в будь-якій області життя, що має характер повторюваності.

Методи дослідження операцій в основному призначені для дослідження технічних, економічних, організаційних та інших проблем формальними методами у випадках, коли може бути отримано кількісне рішення завдання. Методи дослідження операцій застосовуються, головним чином, для пошуку оптимального розподілу ресурсів. Застосування методів дослідження операцій дозволяє досить чітко зрозуміти сутність досліджуваних процесів і явищ, дати кількісні оцінки можливих варіантів рішень. У практиці застосування дослідження операцій застосовується сукупність спеціальних методів: математичного програмування, теорія ігор, метод Монте-Карло, теорія черг.

Приклад застосування графічного методу для вирішення задачі дослідження операцій [47]

Компанія спеціалізується на випуску наборів для пінг-понгу і наборів для великого тенісу. Кожна набір для пінг-понгу дає прибуток величина якого \$ 2, а кожен набір для великого тенісу – \$ 4. На виготовлення одного набору для пінг-понгу витрачається 4 години робочого часу на виробничій ділянці А і 2 години роботи на виробничій ділянці В. Набір для великого тенісу виробляється за 6 годин на виробничій ділянці А, 6 годин на виробничій ділянці В і 1 годину на виробничій ділянці С. Загалом виробнича потужність за день виробничої ділянки А – 120 нормо-годин, ділянки В – 72 нормо-години і ділянки С – 10 нормо-годин.

Розрахувати оптимальний виробничий план наборів для пінг-понгу і наборів для великого тенісу, щоб прибуток від виробничої діяльності підприємства був максимальним.

Умову задачі у табличній формі (див. табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Вихідні дані задачі

Виробничі ділянки	Витрати часу на виготовлення одиниці продукції, нормо-годин		Доступний фонд часу, нормо-годин
	набори для пінг-понгу	набори для великого тенісу	
А	4	6	120
В	2	6	72
С	-	1	10
Прибуток на одиницю продукції, \$	2	4	

Розв'язання.

1. Формулювання задачі. За даною умовою задачі змінні:

x_1 – кількість хокейних ключок, що виготовляються щодня;

x_2 – кількість шахових наборів, що виготовляються щодня.

Цільова функція – максимізація прибутку від виробничої діяльності підприємства:

$$F(x) = (2x_1 + 4x_2) \rightarrow \max .$$

Обмеження на витрати робочого часу на виробничих ділянках А, В та С:

$$\begin{cases} 4x_1 + 6x_2 \leq 120; \\ 2x_1 + 6x_2 \leq 72; \\ x_2 \leq 10. \end{cases}$$

Умова невід’ємності змінних $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$.

2. Побудова прямих, що описуються рівняннями відповідно до кожного із обмежень (рис. 4.1). Так пряма, що позначена на рис. 4.1 (1) відображає обмеження витрат робочого часу ділянки А; пряма, що позначена (2) відображає обмеження витрат робочого часу ділянки В; пряма, що позначена (3) відображає обмеження витрат робочого часу ділянки С.
3. Знаходять напівплощини що графічно відображають обмеження задачі. На прямих (1), (2), (3) штрихами виділено ці напівплощини.
4. Знаходять область допустимих рішень, яка містить точки, для яких реалізуються всі обмеження задачі. Для даної задачі така область має форму п'ятикутника ABCDO (на рис. 4.1 виокремлено темним кольором).
5. Будують пряму рівняння $2x_1 + 4x_2$ цільової функції $F(x)$ (на рис. 2.16 накреслена пунктирною лінією).
6. Пряму пересувають угору у напрямку досягнення екстремуму цільової функції, який на рис. 4.1 показано стрілкою.
7. Точкою у якій цільова функція досягає свого екстремуму є точка С багатокутника ABCDO. Це остання точка з якою перетнеться пряма рівняння $2x_1 + 4x_2$, перш, ніж опиниться за його межами. Дана точка і відповідає оптимальному рішенню задачі. Визначають координати цієї точки. Точка С є перетином прямих (1) і (2). Розв’язавши

загальне рівняння цих прямих, отримують: $x_1^* = 24$, $x_2^* = 4$. Отримані величини підставляють у вираз цільової функції, та обчислюють її значення у точці C: $F(x) = (2x_1 + 4x_2) = 2 \cdot 24 + 4 \cdot 4 = 64$.

Відповідь: максимізації прибутку у розмірі \$ 64 від виробничої діяльності підприємства можна досягти у випадку щоденного вироблення 24 наборів для пінг-пнгу та 4 наборів для великого тенісу.

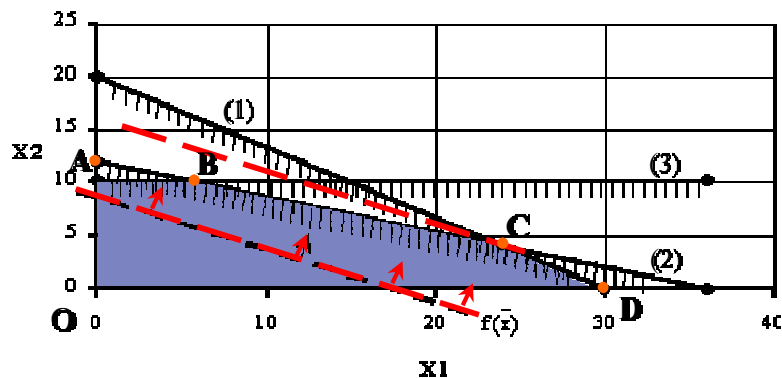


Рис. 4.1. Графічний розв'язок задачі [47]

4.3. Автоматизація розв'язання типових логістичних задач на основі технології Excel Solver

Деякий однорідний виробничий продукт певної виробничої корпорації перевозиться із чотирьох її складів, що розташовані у різних місцях чотирьом споживачам. При перевезенні продукту виробнича корпорація несе відповідні транспортні витрати. Вихідні дані задачі приведені у табл. 4.9.

Знайти маршрут (план) перевезень при якому всі транспортні витрати виробничої корпорації будуть мінімальними.

Вихідні дані для вирішення транспортної задачі

№ з/п перевізника / № з/п складу	Об'єм вантажу на складі, тис. один	№ з/п споживача				Сумарний об'єм замовлення, тис. одиниць
		1	2	3	4	
		Об'єм замовленого вантажу споживачем, тис. один				
		250	100	150	50	550
1	80	6	6	1	4	Витрати перевізників при перевезенні одиниці вантажу від <i>i</i> - го складу <i>j</i> -му споживачу, грн
2	320	8	30	6	5	
3	100	5	4	3	30	
4	50	9	9	9	9	
Сумарний об'єм вантажу на складах, тис. одиниць	550					

Розв'язок.

1. Побудова математичної моделі задачі

Дана задача є транспортною задачею I типу, адже сумарні запаси вантажу дорівнюють сумарним потребам споживачів, тому математична модель будується у відповідності до виразу (2.23) (див. п. 2.5.3.3 даного посібника):

$$f(x) = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \right) \rightarrow \min;$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, i = \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, j = \overline{1, n}; \\ x_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

У загальному вигляді витрати кожного *i*-го перевізника на перевезення вантажу споживачам становлять:

$$C_{\Sigma i} = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_j \right),$$

де C_{Σ} – сумарні транспортні витрати на перевезення одиниці вантажу від i -го складу до j -го споживача;

x_j – кількість одиниць вантажу, запланованого до перевезення j -му споживачу;

c_{ij} – транспортні витрати на перевезення одиниці вантажу від i -го складу до j -го споживача.

Доцільно записати витрати кожного перевізника окремо.

Витрати перевізника 1:

$$C_{\Sigma 1} = \sum_{j=1}^4 c_{1j}x_j = c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + c_{13}x_3 + c_{14}x_4 = 6x_1 + 6x_2 + 1x_3 + 4x_4 .$$

Витрати перевізника 2:

$$C_{\Sigma 2} = \sum_{j=1}^4 c_{2j}x_j = c_{21}x_1 + c_{22}x_2 + c_{23}x_3 + c_{24}x_4 = 8x_1 + 30x_2 + 6x_3 + 5x_4 .$$

Витрати перевізника 3:

$$C_{\Sigma 3} = \sum_{j=1}^4 c_{3j}x_j = c_{31}x_1 + c_{32}x_2 + c_{33}x_3 + c_{34}x_4 = 5x_1 + 4x_2 + 3x_3 + 30x_4 .$$

Витрати перевізника 4:

$$C_{\Sigma 4} = \sum_{j=1}^4 c_{4j}x_j = c_{41}x_1 + c_{42}x_2 + c_{43}x_3 + c_{44}x_4 = 9x_1 + 9x_2 + 9x_3 + 9x_4 .$$

Тоді загальна цільова функція на основі попередніх розрахунків сумарних витрат кожного перевізника матиме вигляд:

$$f(x) = (C_{\Sigma 1} + C_{\Sigma 2} + C_{\Sigma 3} + C_{\Sigma 4}) = \left(\sum_{j=1}^4 (c_{1j}x_j + c_{2j}x_j + c_{3j}x_j + c_{4j}x_j) \right) \rightarrow \min .$$

Для формування загальних обмежень на перевезення всіх вантажів із складів доцільно визначити об'єми перевезень для кожного перевізника окремо:

– перевізник 1:

$$a_1 = x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 80 \text{ (тис. одиниць продукції);}$$

– перевізник 2:

$$a_2 = x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} = 320 \text{ (тис. одиниць продукції);}$$

– перевізник 3:

$$a_3 = x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} = 100 \text{ (тис. одиниць продукції);}$$

– перевізник 4:

$$a_4 = x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} = 50 \text{ (тис. одиниць продукції).}$$

Для формування загальних обмежень щодо задоволення потреб всіх споживачів доцільно визначити об'єми перевезень для кожного споживача окремо:

– споживачу 1:

$$b_1 = x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} = 250 \text{ (тис. одиниць продукції);}$$

– споживачу 2:

$$b_2 = x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} = 100 \text{ (тис. одиниць продукції);}$$

– споживачу 3:

$$b_3 = x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} = 150 \text{ (тис. одиниць продукції);}$$

– споживачу 4:

$$b_4 = x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} = 50 \text{ (тис. одиниць продукції).}$$

2. Автоматизація розв'язання задачі технологією Excel Solver

Створення форми для введення умов задачі у MS Excel, наприклад, за рис. 4.2 та форми для виведення розв'язку задачі, наприклад, за рис. 4.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	ВИХІДНІ ДАНІ							
2			Споживачі				Сумарна величина потреб	
3	Постачальники	Потужності постачальників (запаси вантажу)	Споживач 1	Споживач 2	Споживач 3	Споживач 4		
4			Потужності (потреби у вантажі) споживачів					
5			250	100	150	50	550	
6	Постачальник 1	80	6	6	1	4	Витрати на перевезення одиниці вантажу від і-го постачальника до j-го споживача	
7	Постачальник 2	320	8	30	6	5		
8	Постачальник 3	100	5	4	3	30		
9	Постачальник 4	50	9	9	9	9		
10	Сумарна величина запасів	550	Витрати на перевезення одиниці вантажу від і-го постачальника до j-го споживача					

Рис. 4.2. Форма для введення вихідних даних задачі

	A	B	C	D	E	F	G	H
12	МАТРИЦЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ (ЗМІНЮВАНІ КОМІРКИ)							
13	Постачальник 1	0	0	0	0	0	Оптимальні об'єми перевезень вантажу від і-го постачальника до j-го споживача	
14	Постачальник 2	0	0	0	0	0		
15	Постачальник 3	0	0	0	0	0		
16	Постачальник 4	0	0	0	0	0		
17	Цільва функція - вартість плану перевезень = min	0	0	0	0	0	Потужності споживачів	
18			Споживач 1	Споживач 2	Споживач 3	Споживач 4		
19								

Рис. 4.3. Форма для виведення розв'язку задачі

У форму для виведення розв'язку задачі вводяться залежності із математичної моделі (рис. 4.4).

	A	B	C	D	E	F	G	H
12	МАТРИЦЯ ПЕРЕВЕЗЕНЬ (ЗМІНЮВАНІ КОМІРКИ)							
13	Постачальник 1	=СУММ(C13:F13)	0	0	0	0	Оптимальні об'єми перевезень вантажу від і-го постачальника до j-го споживача	
14	Постачальник 2	=СУММ(C14:F14)	0	0	0	0		
15	Постачальник 3	=СУММ(C15:F15)	0	0	0	0		
16	Постачальник 4	=СУММ(C16:F16)	0	0	0	0		
17			=СУММ(C13:C16)	=СУММ(D13:D16)	=СУММ(E13:E16)	=СУММ(F13:F16)	Потужності споживачів	
18	Цільва функція - вартість плану перевезень = min	=СУММПРОИЗВ(C6:F9;C13:F16)	Споживач 1	Споживач 2	Споживач 3	Споживач 4		
19								

Рис. 4.4. Форма з введеними залежностями із математичної моделі

В комірку "Цільова функція", що відображає транспортні витрати вводиться вираз для автоматизованого обчислення загальних транспортних

витрат, зокрема сума добутоків $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}$ потреб у вантажах відповідних споживачів на транспортні витрати, що виникають при перевезенні цих вантажів, наприклад, наступним чином:

=СУММПРОИЗВ(C6:F9;C13:F16)

В комірці, що відображають запаси вантажу на складах вводиться вираз для автоматизованого обчислення суми об'ємів перевезень вантажу від *i*-го складу *i*-им перевізником до *j*-го споживача, наприклад, наступним чином:

=СУММ(C13:F13)

=СУММ(C14:F14)

=СУММ(C15:F15)

=СУММ(C16:F16)

В комірці, що відображають потреби у вантажі відповідного споживача, вводиться вираз для автоматизованого обчислення суми об'ємів перевезень *j*-му споживачу із *i*-их складів, наприклад, наступним чином:

=СУММ(C13:C16)

=СУММ(D13:D16)

=СУММ(E13:E16)

=СУММ(F13:F16)

Запускається надбудова "Пошук рішення". Результати розв'язку задачі приведені на рис. 4.5.

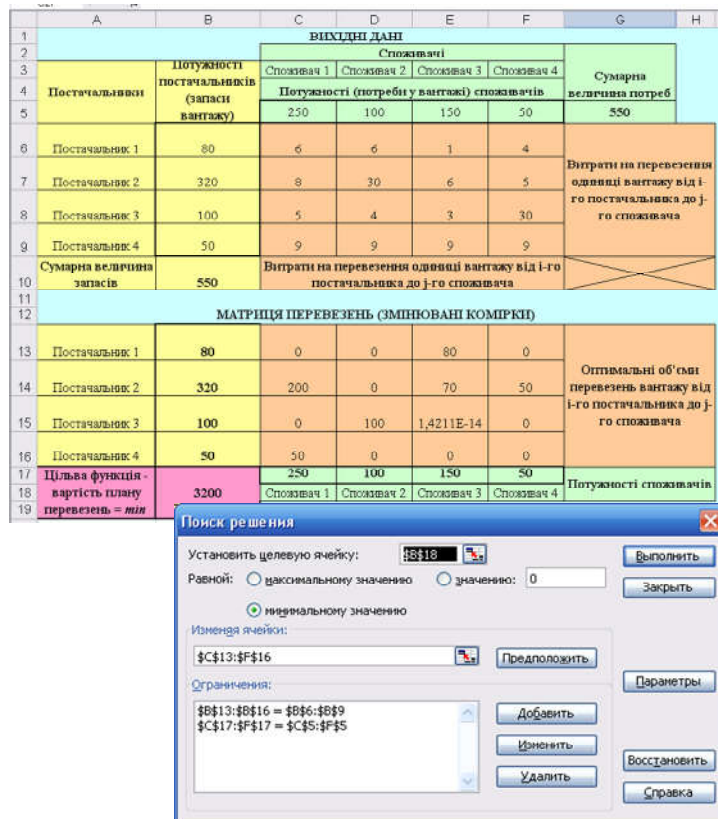


Рис. 4.5. Вікно надбудови "Пошук рішення" та отриманий розв'язок задачі

В результаті отримано наступний оптимальний план перевезень (табл. 4.10).

Таблиця 4.10

Оптимальний план перевезень

№ перевізника	Об'єми перевезень, тис. одиниць				
Перевізник 1	80	0	0	80	0
Перевізник 2	320	200	0	70	50
Перевізник 3	100	0	100	0	0
Перевізник 4	50	50	0	0	0
Транспортні витрати, грн.	3200	250	100	150	50
		Спожи вач 1	Спожи вач 2	Спожи вач 3	Спожи вач 4

Інтерпретація отриманих результатів

У відповідності до наведеного в табл. 4.10 можна стверджувати, що мінімальні транспортні витрати у сумі 3200 грн. будуть, якщо здійснювати перевезення за наступними маршрутами:

- перевізник 1 доставить 80 тис. одиниць вантажу споживачу 3;

- перевізник 2 доставить 200 тис. одиниць вантажу споживачу 1, 70 тис. одиниць вантажу споживачу 3 та 50 тис. одиниць вантажу споживачу 4;
- перевізник 3 доставить 100 тис. одиниць вантажу споживачу 2;
- перевізник 4 доставить 50 тис. одиниць вантажу споживачу 1.

В такому випадку всі потреби споживачів будуть задоволені, а транспортні витрати будуть мінімальними.

4.3. Автоматизація розв'язання типових задач планування виробництва на основі технології Excel Solver та аналіз розв'язку задачі на чутливість

Умова задачі із літератури [47]: на ковальсько-штампувальному заводі виготовляють чотири види поковок валів для автомобільної промисловості «АвтоКрАЗ», «АвтоЗАЗ»:

- К545 (65053-2220025) – вал ведучий опори проміжної;
- К546 (65053-2220026) – вал ведений опори проміжної;
- К540 (260-1802176-10) – вал приводу мосту середнього;
- К541 (6443-1802176) – вал приводу.

Виготовлення поковок проводиться методом гарячого видавлювання [47].

Інформація щодо видів ресурсів, необхідних для виготовлення поковок, витрат ресурсів на виробництво кожного виду продукції, величини їх запасів та доходах, отримуваних від реалізації одиниці поковки кожного виду, приведена в табл. 4.11.

Необхідно знайти такий місячний план виготовлення поковок, при якому прибуток підприємства буде максимальним, а витрати ресурсів не перевищать їх наявних об'ємів [47].

Вихідні дані для вирішення задачі оптимального розподілу ресурсів

[47]

№ з/п	Види ресурсів	Норма витрат ресурсів на одиницю виробу				Величина запасів ресурсів
		вал ведучий опори проміжної К545	вал ведений опори проміжної К546	вал приводу мосту середнього К540	вал приводу К541	
1	Сировина (Сталь 45), кг	1,00	2,00	3,00	2,00	300,00
2	Оплата праці, грн	5,00	3,00	4,00	2,00	10000,00
3	Електрична енергія, кВт/год.	10,00	15,00	10,00	12,00	1000,00
4	Паливно-мастильні матеріали, л	0,20	0,10	0,15	0,10	3,00
5	Транспортні витрати, грн	1,00	1,50	1,20	2,00	5000,00
6	Обладнання (пневмомолоти), верстат/год	2,00	4,00	3,00	8,00	130,00
	Прибуток від реалізації одиниці продукції	3,00	3,50	3,00	2,00	X

Розв'язок.**1. Математичне моделювання задачі.**

1.1. Цільовою функцією задачі у відповідності до вихідних даних табл. 4.11 є максимізація сумарного прибутку підприємства від реалізації виготовленої продукції [47]:

$$f(x) = [c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4] = (3x_1 + 3,5x_2 + 3x_3 + 2x_4) \rightarrow \max,$$

де c_1, c_2, c_3, c_4 – прибуток від реалізації одиниці продукції виду:

1 – валу ведучого опори проміжної;

2 – валу веденого опори проміжної;

3 – валу приводу мосту середнього;

4 – валу приводу,

що становить 3,00; 3,50; 3,00; 2,00 грн. відповідно;

x_1, x_2, x_3, x_4 – кількість одиниць виготовленої продукції 1, 2, 3 та 4 виду.

1.2. Функціональні обмеження на використання ресурсів при виробництві [47]:

обмеження використання сталі [47]:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 \leq b_1 ;$$

$$1x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 2x_4 \leq 300 .$$

обмеження використання фонду оплати праці [47]:

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 \leq b_2 ;$$

$$5x_1 + 3x_2 + 4x_3 + 2x_4 \leq 10000 .$$

обмеження використання електричної енергії [47]:

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 \leq b_3 ;$$

$$10x_1 + 15x_2 + 10x_3 + 12x_4 \leq 1000 .$$

обмеження використання паливно-мастильних матеріалів [47]:

$$a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4 \leq b_4 ;$$

$$0,2x_1 + 0,1x_2 + 0,15x_3 + 0,1x_4 \leq 3 .$$

обмеження транспортних витрат [47]:

$$a_{51}x_1 + a_{52}x_2 + a_{53}x_3 + a_{54}x_4 \leq b_5 ;$$

$$1x_1 + 1,5x_2 + 1,2x_3 + 2x_4 \leq 5000 .$$

обмеження використання технологічного обладнання [47]:

$$a_{61}x_1 + a_{62}x_2 + a_{63}x_3 + a_{64}x_4 \leq b_6 ;$$

$$2x_1 + 4x_2 + 3x_3 + 8x_4 \leq 130 .$$

1.3. Умова невід'ємності змінних x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , що виражають кількість одиниць продукції виду 1 – валу ведучого опори проміжної, виду 2 – валу веденого опори проміжної, виду 3 – валу приводу мосту середнього та виду 4 – валу приводу відповідно [47]:

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, x_4 \geq 0.$$

2. Автоматизований розв'язок задачі

2.1. Створення форми для введення умови задачі (рис. 4.6).

2.2. Завдання адрес комірок, в які буде поміщений результат розв'язку задачі (змінювані комірки) [47].

C4:F4 – адреси комірок, в які будуть поміщені значення x_1, x_2, x_3, x_4 . [47].

C14 – адреса комірки, в яку буде поміщене оптимальне значення цільової функції [47].

2.3. Введення вихідних даних.

Після введення вихідних даних у створену форму, отримаємо таблицю, що приведена на рис. 4.7.

2.4. Введення залежності для цільової функції у комірку.

Встановити курсор у комірку **C14** [47].

Встановити курсор на кнопку **Майстер функцій**. На екрані з'явиться діалогове вікно **Майстер функцій**, в категорії **Математичні** вибрати функцію **СУММПРОИЗВ**. Заповнити поле **Масив 1**, ввівши адреси комірок **C4:F4**, та **Масив 2**, ввівши адреси комірок **C13:F13** (рис. 4.7) [47].

2.5. Введення залежностей для обмежень.

У комірки **G7:G12**, використовуючи **Майстер функцій** та функцію **СУММПРОИЗВ**, послідовно ввести формули для розрахунку загальної величини витрат кожного виду ресурсу, визначеними для даної задачі та описаними раніше [47].

2.6. Встановлення цільової комірки – завдання призначення цільової функції.

2. 6.1. Запустити **Пошук рішення**.

2.6.2. В діалоговому вікні **Пошук рішення** заповнити поле **Встановити цільову комірку** В усіх задачах для засобу **Пошук рішення** оптимізується результат в одній із комірок робочого листа. Цільова комірка зв'язана з іншими комірками цього робочого листа за допомогою формул. Засіб **Пошук рішення** використовує формули, які дають результат в цільовій комірці для перевірки можливих рішень. Можна обрати пошук найменшого або найбільшого значення для цільової комірки або встановити конкретне значення. Для вирішення даної задачі необхідно здійснити пошук найбільшого значення. Для цього виконати наступні дії [47]:

– в полі **Встановити цільову комірку** ввести адресу комірки **C14** [47]

(рис. 4.7);

– включити опцію **Рівній максимальному значенню** (рис. 4.7).

2.6.3. В діалоговому вікні **Пошук рішення** заповнити поле **Змінювані комірки**. Це комірки, значення яких будуть змінюватись, для того, щоб оптимізувати результат в цільовій комірці. До змінюваних комірок висувають дві основні вимоги: вони не повинні містити формули і зміна їх значень повинна відображатись на зміні результату в цільовій комірці. Іншими словами, цільова комірка залежить від змінюваних комірок. В поле **Змінювані комірки** вводяться адреси комірок **C4:F4**, в яких мають знаходитись шукані значення x_1, x_2, x_3, x_4 [47] (рис. 4.8).

2.7. Введення обмежень. В діалоговому вікні **Пошук рішення** заповнити поле **Обмеження**, для чого натиснути кнопку **Добавити** і у діалоговому вікні **Добавлення обмежень** заповнити поля [47]:

– **Посилання на комірку**. В поле ввести адресу комірки **G7**, що містить загальну величину витрат сировини на виготовлення продукції [47].

– В наступному полі вибрати знак \leq .

– В поле **Обмеження** ввести адресу комірки **I7**, що містить величину запасів сировини. Ввести всі обмеження і натиснути **ОК** [47].

2.8. Введення параметрів для вирішення задачі. В діалоговому вікні **Пошук рішення** натиснути кнопку **Параметри**, відкриється вікно **Параметри пошуку рішення**, в якому включити опції **Лінійна модель**, що забезпечить використання симплекс-метода, та **Невід’ємні значення**. Натиснути кнопку **ОК**. Перейти у вікно **Пошук рішення**, натиснути кнопку **Виконати**. На екрані з’явиться діалогове вікно **Результати пошуку рішення** (рис. 4.9) [47].

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	Оптимальний план виробництва на місяць									
3			Змінні				Обмеження			Залишок ресурсів
4		Значення змінних (оптимальний)	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
5	№ з/п	Види ресурсів	вал ведучий проміжної	вал ведений проміжної	вал приводу середнього	вал приводу	Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	Знак	Величина запасів ресурсів	
6			Норма витрат ресурсів на одиницю виробу, грн							
7	1	Сировина (Сталь 45), кг								0,00
8	2	Оплата праці, грн								0,00
9	3	Електрична енергія квт/год								0,00
10	4	Паливно-мастильні матеріали, л								0,00
11	5	Транспортні витрати, грн								0,00
12	6	Обладнання (пневмомолоти зусиллям 3000 кг) верстаго/год								0,00
13	7	Коефіцієнти цільової функції (прибуток від реалізації продукції), грн								
14	8	Цільова функція (Планований прибуток підприємства, грн)								

Рис. 4.6. Екранна форма Excel для введення даних задачі оптимального розподілу ресурсів [47]

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	Оптимальний план виробництва на місяць									
3			Змінні				Обмеження			Залишок ресурсів
4		Значення змінних (оптимальний план)	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
5	№ з/п	Види ресурсів	вал ведучий проміжної опори	вал ведений проміжної опори	вал приводу середнього мосту	вал приводу	Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	Знак	Величина запасів ресурсів	
6			Норма витрат ресурсів на одиницю виробу, грн							
7	1	Сировина (Сталь 45), кг	1,00	2,00	3,00	2,00	0,00	<=	300,00	300,00
8	2	Оплата праці, грн	5,00	3,00	4,00	2,00	0,00	<=	10000,00	10000,00
9	3	Електрична енергія квт/год	10,00	15,00	10,00	12,00	0,00	<=	1000,00	1000,00
10	4	Паливно-мастильні матеріали, л	0,20	0,10	0,15	0,10	0,00	<=	3,00	3,00
11	5	Транспортні витрати, грн	1,00	1,50	1,20	2,00	0,00	<=	5000,00	5000,00
12	6	Обладнання (пневмомолоти зусиллям 3000) верстаго/год	2,00	4,00	3,00	8,00	0,00	<=	130,00	130,00
13	7	Коефіцієнти цільової функції (прибуток від реалізації продукції), грн	3,00	3,50	3,00	2,00				
14	8	Планований прибуток підприємства (цільова функція), грн								

Рис. 4.7 Екранна форма Excel з введеними даними задачі оптимального розподілу ресурсів [47]

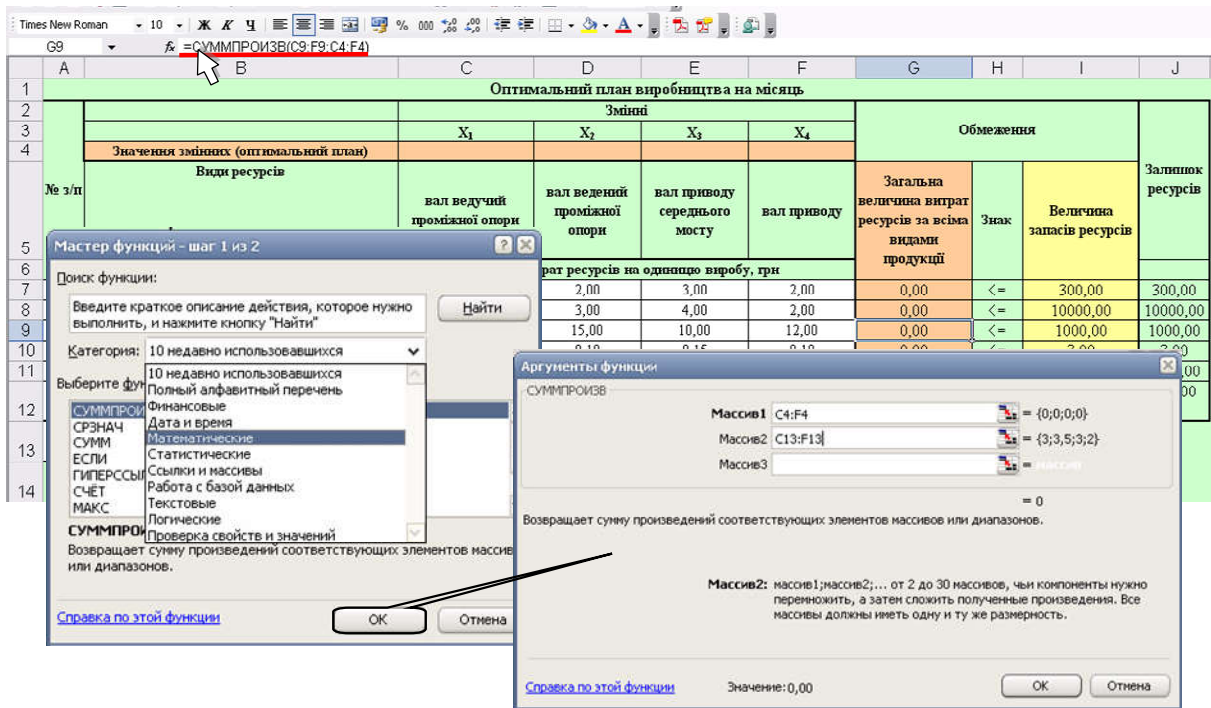


Рис. 4.8. Екранні форми Excel для введення розрахункових формул за прикладом п. 2.3.4 [47]

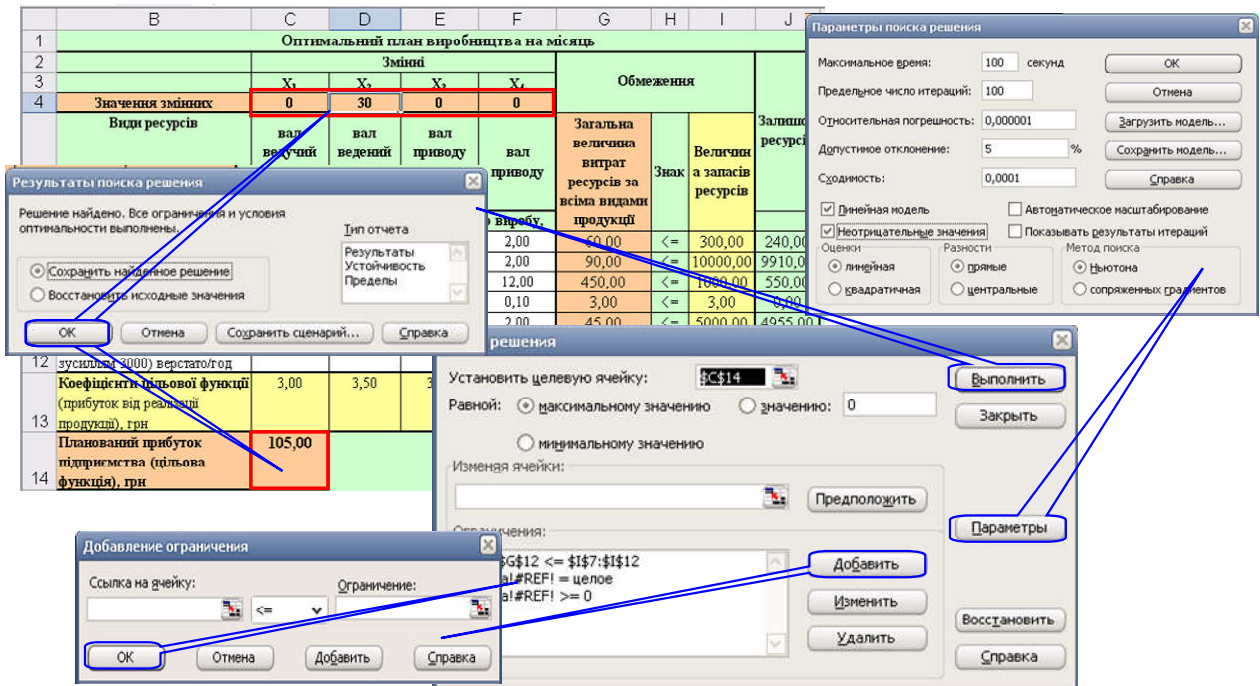


Рис. 4.9. Екранні форми Excel результату вирішення задачі оптимального розподілу ресурсів [47]

Інтерпретація результатів. Отримані результати означають, що максимальний прибуток в розмірі 105 тис. грн. підприємство отримає при виготовленні 30 поковок валу веденого опори проміжної. При цьому паливно-мастильні матеріали будуть використані повністю, а залишок інших ресурсів буде наступний: сировини 240 кг, електричної енергії 550 кВт / год, транспортних витрат 4955,00 грн., обладнання 10 верстатом / год, витрат на оплату праці 9910,00 грн. [47].

4.4. Аналіз задачі на чутливість

Визначення оптимальних значень виробничої програми не завжди є достатньою умовою для формування виробником правильного керуючого рішення при організації виробництва. В більшості випадків формулюється задача дослідження впливу на значення одержуваного прибутку (або витрат), збільшення кожного з використаних ресурсів, вдосконалення того чи іншого ТП, зміни вартості використовуваної сировини, що впливає на прибутковість виробничо-технологічних процесів. Це означає, що необхідно знати, в якому інтервалі можна змінювати вхідні параметри моделі без істотного відхилення від знайденого оптимуму і без порушення структури базису, що формує оптимальне рішення. Дослідження, що проводяться в рамках такої задачі, називаються **аналізом моделі на чутливість** [47].

Надбудова "**Пошук рішення**" дозволяє автоматично сформувати звіт на чутливість, який дає можливість визначити чутливість отриманого рішення (оптимального плану) до змін початкових даних з метою покращення отриманого результату [47].

Відповідно до рис. 4.10 цифри у виносках позначають наступне:

- 1 – **оптимальний план задачі.** Максимальний прибуток 105 тис. грн. підприємство отримає, якщо буде випускати 30 одиниць продукції x_2 (поковок валу веденого опори проміжної) [47];
- 2 – **нормована вартість** – це параметр, що показує, як зміниться цільова функція, в даному випадку прибуток підприємства, якщо розпочати виробництво продукції, яка відсутня в оптимальному

плані. Наприклад, якщо нормована вартість продукції x_1 складає – 4, то примусовий випуск 2 одиниць продукції x_1 , яких немає в оптимальному плані, приведе до зменшення прибутку на $2 \cdot (-4) = -8$ тис.грн. Тоді прибуток зменшиться і складатиме $105 - 8 = 97$ тис. грн. [47];

3 – коефіцієнти ЦФ (цільові коефіцієнти) [47];

Целевой Коэффициент
3
3,5
3
2

4 5 – **границі зміни значень коефіцієнтів ЦФ** за умови, що кількість оптимальної продукції (план) не зміниться. Наприклад, якщо цільовий коефіцієнт (ЦК1) продукції x_1 дорівнює 3 (прибуток від реалізації одиниці продукції x_1), то, змінюючи його у межах $3 - 1E+30 \leq \text{ЦК1} \leq 3 + 4$, план не зміниться, але величина доходу може зменшитись або збільшитись. Це можна перевірити, якщо запустити програму **Пошук рішень** після внесення в таблицю змін даного коефіцієнта [47];

Допустимое Увеличение	Допустимое Уменьшение
4	1E+30
1E+30	1,5
2,25	1E+30
1,5	1E+30

6 – **кількість використаних ресурсів** [47];

Результ. значение
60,00

7 – **тіньова ціна** стосується обмежень, тобто, певне значення вказує на "цінність" обмеженого ресурсу порівняно з іншими ресурсами. Цей показник показує як зміниться оптимальне значення ЦФ (в даному випадку плановий прибуток підприємства) при зміні запасів ресурсів на одиницю. В даному випадку оптимальне значення ЦФ зміниться тільки при збільшенні запасів паливно-мастильних матеріалів. Наприклад, якщо збільшити їх запас на 2 одиниці, тобто $2 \cdot 35 = 70$, то прибуток, наприклад, в грошовому еквіваленті, збільшиться і буде становити $105 + 70 = 175$ тис. грн. [47];

Теневая Цена
0,00
0,00
0,00
35,00

8 – **запаси ресурсів** [47];

Ограничение Правая часть
300
10000

9	10
Допустимое Увеличение	Допустимое Уменьшение
1E+30	240
1E+30	9910
1E+30	550
0,25	3

показники, що задають діапазон зміни запасів ресурсів, на які вказує виноска 8, в якому діє тіньова ціна (аналогічно до діапазонів, на які вказують виноска 4 та 5). Наприклад, діапазон зміни запасу паливно-мастильних матеріалів знаходиться в межах від 0,25 до 3 одиниць. Якщо вказаний ресурс відповідно до вказаного виноскою 7 збільшити на 10 одиниць, то про зміну прибутку нічого сказати неможливо, тому що величина збільшення ресурсу знаходиться за допустимими межами [47].

Ячейка		Имя	Результ. значение	Нормир. стоимость	Целевой Коэффициент	Допустимое Увеличение	Допустимое Уменьшение
9	\$C\$4	Значення змінних (оптимальний план) X1	0	-4	3	4	1E+30
10	\$D\$4	Значення змінних (оптимальний план) X2	30	0	3,5	1E+30	1,5
11	\$E\$4	Значення змінних (оптимальний план) X3	0	-2,25	3	2,25	1E+30
12	\$F\$4	Значення змінних (оптимальний план) X4	0	-1,5	2	1,5	1E+30
Ячейка		Имя	Результ. значение	Теневая Цена	Ограничение Правая часть	Допустимое Увеличение	Допустимое Уменьшение
17	\$G\$7	Сировина (Сталь 45), кг Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	60,00	0,00	300	1E+30	240
18	\$G\$8	Оплата праці, грн Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	90,00	0,00	10000	1E+30	9910
19	\$G\$9	Електрична енергія квт/год Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	450,00	0,00	1000	1E+30	550
20	\$G\$10	Паливно-мастильні матеріали, л Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	3,00	35,00	3	0,25	3
21	\$G\$11	Транспортні витрати, грн Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	45,00	0,00	5000	1E+30	4955
22	\$G\$12	Обладнання (пневмомолоти зусиллям 3000 кг) верстат/год Загальна величина витрат ресурсів за всіма видами продукції	120,00	0,00	130	1E+30	10

Рис. 4.10. Звіт на чутливість задачі оптимального розподілу ресурсів [47]

5. САМОСТІЙНА РОБОТА

5.1. Загальні методичні вказівки до самостійної роботи

Самостійна робота аспірантів є однією з умов ґрунтовного засвоєння знань з навчальної дисципліни. Самостійна робота має різні напрями відповідно до основних форм навчання аспірантів:

- для аспірантів очної (денної) / очної (вечірньої) форми навчання;
- для аспірантів заочної форми навчання.

Для аспірантів очної (денної / вечірньої) форми навчання самостійна робота складається з:

- 1) самостійного вивчення теоретичних питань згідно із робочою навчальною програмою або силабусом навчальної дисципліни;
- 2) підготовки до виконання практичних занять, яка включає у себе ознайомлення з темою та метою заняття, завданням, ознайомлення з контрольними запитаннями та формування відповідей на них та оформлення звітів відповідно до вимог методичних рекомендацій;
- 3) підготовки до семінарських занять, яка включає у себе підготовку доповіді та запитань за темами семінарських занять;
- 4) підготовки до модульної контрольної роботи та залікової роботи (у випадку необхідності або бажання її виконувати)

Для **аспірантів заочної форм навчання** самостійна робота містить наступні складові:

1) самостійне опанування теоретичних питань згідно лекційного курсу, та робочої навчальної програми або силабусу навчальної дисципліни;

2) підготовки до виконання практичних занять, яка включає у себе ознайомлення з темою та метою заняття, завданням, ознайомлення з контрольними запитаннями та формування відповідей на них та оформлення звітів відповідно до вимог методичних рекомендацій

3) підготовки теоретичного матеріалу для складання екзамену / заліку відповідно до переліку екзаменаційних питань;

4) виконання контрольної роботи, яка дозволяє визначити якість самостійного опрацювання теоретичного матеріалу та набуття практичних навичок щодо застосування новітніх інформаційних технологій та правильного розв'язання типових задач.

Перевірка самостійної роботи аспірантів **очної форми** навчання здійснюється регулярно на лекційних, практичних та семінарських заняттях, під час проведення модульної контрольної роботи і проміжного контролю. Перевірка самостійної роботи аспірантів **заочної форми** навчання проводиться шляхом перевірки контрольних робіт та складання екзамену / заліку.

Усі складові самостійної роботи є складовою оцінки за рейтинговою системою оцінювання. У цілому рейтинг аспіранта складається з балів, отриманих за:

- 1) виконання практичних робіт;
- 2) доповіді за темами семінарських занять;
- 3) виконання модульної контрольної роботи.

3.2. Теоретичні питання для самостійного вивчення

Опрацювання теоретичних питань є запорукою кращого засвоєння лекційного матеріалу, що читається викладачем на лекціях, у рекомендованих викладачем інформаційних джерелах та даному навчальному посібнику.

Вивчення дисципліни спрямовано на формування у аспірантів науково-професійних компетентностей, що передбачають здійснення інноваційної, педагогічної, експериментально-дослідницької, професійної та науково-організаційної діяльності. Також дисципліна забезпечує підготовку докторів філософії що здійснюють прикладні наукові дослідження в сфері автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, провадять дослідницько-інноваційну діяльність, здійснюють розробку і впровадження теорій та концепцій управління різноманітними складними системами та процесами в умовах неповноти, обмеженості та дефіциту інформації, ресурсів, часу.

Вивчення дисципліни базується на знанні таких загальноосвітніх та загально-технічних дисциплін як математика, інформатика, комп'ютерні технології та програмування, теорія автоматичного управління. Крім того для успішного освоєння даної дисципліни аспірант повинен відповідати наступним критеріям:

- мати уміння та навички роботи з персональним комп'ютером на рівні впевненого користувача;
- знати та розуміти базові принципи організації інформації у комп'ютерних системах;

– засвоїти такі навчальні курси другого (магістерського) рівня вищої освіти як “Математичне моделювання процесів і систем”, та “Інтелектуальні та інформаційні системи”.

Згідно з вимогами освітньо-наукової програмами третього рівня вищої освіти спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” аспіранти повинні оволодіти навичками:

- абстрактного мислення, аналізу та синтезу;
- швидкого пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел;
- використання сучасних інформаційних та комунікаційних технологій, баз даних та інших електронних ресурсів, спеціалізованого програмного забезпечення у науковій та освітній діяльності.

Перелік питань до самостійного вивчення

1. Які існують види наукових досліджень?
2. Зміст фундаментальних і прикладних наукових досліджень
3. Зміст теоретичних та емпіричних наукових досліджень
4. Які існують етапи наукових досліджень?
5. Які бувають види наукових результатів?
6. У чому полягає зміст системного аналізу?
7. У чому полягає зміст системного підходу?
8. Дати пояснення структурованим, слабо структурованим та неструктурованим науковим проблемам. Особливості підходів щодо їх вирішення.
9. Пояснити сутність аспектного та концептуального підходів до вирішення наукових проблем.
10. Пояснити сутність поняття системи.
11. Дати визначення поняттям “структура системи”, “елемент системи”, “підсистема”.
12. Способи представлення структури систем.
13. Матеріальні та абстрактні системи.
14. Штучні та природні системи.
15. Прості, складні та великі системи.
16. Статичні та динамічні системи.

17. Керовані та некеровані системи.
18. Детерміновані та стохастичні системи.
19. Дискретні та безперервні системи.
20. Відкриті та закриті (замкнуті) системи.
21. Сутність принципу модульності системного підходу.
22. Сутність принципу інваріантності системного підходу.
23. Сутність принципу емерджентності системного підходу.
24. Сутність принципу синергетичної інтеграції системного підходу.
25. Які існують методи системного аналізу.
26. У чому полягають евристичні методи системного аналізу?
27. У чому полягають формалізовані методи системного аналізу?
28. У чому полягають комплексні методи системного аналізу?
29. Які складові мають технології м'яких обчислень (Soft Computing)?
30. Пояснити зміст поняття м'яких обчислень.
31. Принципи синтезу штучних нейронних мереж.
32. Навести приклади практичного застосування нейротехнології для розв'язання практичних задач системного аналізу
33. Навести приклади застосування фрактального аналізу для розв'язання задач науково-прикладного характеру.
34. Пояснити сутність фрактального аналізу.
35. Пояснити сутність генетичних обчислень.
36. Пояснити сутність нечіткої логіки.
37. Зміст гібридних технологій.
38. Навести приклади застосування гібридних технологій для розв'язання задач науково-прикладного характеру.
39. Моделі штучних нейронних мереж для асоціативної пам'яті.
40. Моделі штучних нейронних мереж для задач кластерного аналізу.
41. Моделі штучних нейронних мереж для задач прогнозування.
42. Вплив функції активації на роботу штучних нейронних мереж та основні види функції активації.
43. Штучні нейронні мережі прямого поширення: особливість їх будови та роботи, практичного застосування, переваги та недоліки.

44. Рекурентні нейронні мережі прямого поширення: особливість їх будови та роботи, практичного застосування, переваги та недоліки.
45. Згорткові штучні нейронні мережі прямого поширення: особливість їх будови та роботи, практичного застосування, переваги та недоліки.
46. Особливості навчання штучних нейронних мереж.
47. Логіка нечітких висловлень.
48. Інтелектуальні системи управління.

5.3. Зміст завдань для контрольної та / або самостійної роботи



Практичні завдання

1. Використовуючи технологію Excel Solver розв'язати транспорту задачу, вихідні дані якої наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Вихідні дані для вирішення транспортної задачі

Спожи- вачі Склад	Споживач 1	Споживач 2	Споживач 3	Споживач 4	Запаси на складах
Склад 1	2	5	5	5	60
Склад 2	1	2	1	4	80
Склад 3	3	1	5	2	60
Потреби	50	40	70	40	200

2. Використовуючи технологію генетичних обчислень розв'язати транспорту задачу, вихідні дані якої наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Вихідні дані для вирішення транспортної задачі

Спожи- вачі Склад	Споживач 1	Споживач 2	Споживач 3	Споживач 4	Запаси на складах
Склад 1	2	3	2	4	50
Склад 2	1	2	1	3	70
Склад 3	3	1	2	2	80
Потреби	50	40	70	40	200

3. Використовуючи нейротехнологію розв'язати задачу класифікації ірисів у наступній постановці. Зібрано дані про 150 квіток трьох класів: Iris Setosa, Iris Versicolour, Iris Virginica, по 50 записів для кожного. Для кожної квітки відома довжина і ширина чашолистка і пелюстки. Визначити до якого класу належить квітка з довжиною чашолистка і пелюстки 6,2 см та 4,9 см відповідно.



Теоретичні питання

4. Дати загальну характеристику задач дослідження операцій.
5. Записати математичну модель транспортної задачі відкритого типу.
6. Записати математичну модель транспортної задачі закритого типу.
7. Записати математичну модель задачі управління запасами.
8. Записати математичну модель задачі оптимального розподілу ресурсів.
9. Охарактеризувати типові задачі дослідження операцій.
10. Як збільшити прибуток підприємства від виробництва виробів А і В, якщо для цього використовується токарне, зварювальне та фрезерне обладнання. Прибуток підприємства від виробництва одиниці виробів А та В, витрати часу на обробку одного виробу на кожному виді обладнання, а також загальні фонд робочого часу кожної одиниці обладнання протягом місяці вказані в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Назва обладнання	Витрати часу на обробку виробів, год.		Загальний фонд робочого часу, год.
	А	В	
Фрезерне	0,3	0,1	75
Токарне	0,1	0,1	30
Зварювальне	0,1	0,4	84
Прибуток, грн.	3	4	

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Никифоров А.Л. Роль науки в современном обществе // Философия науки. – Вып. 19. – 2014. – с. 36-63.
2. Доклад ЮНЕСКО по науке: на пути к 2030 году. Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО). – Издательский Дом МАГИСТР-ПРЕСС, 2016. – 819 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000235406_rus – Название с экрана
3. Пушкарь А. И., Потрашкова Л. В. Основы научных исследований и организация научно-исследовательской деятельности. Учебное пособие / А. И. Пушкарь, Л. В.Потрашков. – Харьков, ХНЭУ, 2009. – 306 с.
4. Черепанська І.Ю. Прецизійна приладова система вимірювання кутів: дис. ... доктор техн. наук: 05.11.01 “Прилади та методи вимірювання механічних величин” / Ірина Юріївна Черепанська. – Київ., 2019. – 433 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/29631>.
5. Черепанська І. Ю. Автоматизація процесу керування вибором пристроїв орієнтування при проектуванні гнучких інтегрованих систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 “Автоматизація процесів керування” / Ірина Юріївна Черепанська. – Київ., 2008. – 380 с. https://library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1187448
6. Закон України №3715-VI “Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні” / Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2012. – № 19-20. – 166 с.
7. Волков Ю.Г. Диссертация. Подготовка, защита, оформление. Практическое пособие /Под ред. Н.И. Загузова. Изд. 2-е, испр. и доп. - М.: Гардарики, 2003. - 185 с.
8. Кузин Ф.А. Кандидатская диссертация. Методика написания, правила оформления и порядок защиты. Практическое руководство для аспирантов и соискателей учёной степени. - 6-е изд., доп. - М.: Ось-89, 2003. - 224 с.

9. Довідник здобувача наукового ступеня. Збірник нормативних документів та інформаційних матеріалів з питань атестації наукових кадрів вищої кваліфікації / Упорядник Ю.І. Цеков; передне слово Р.В. Бойка. – К.: Редакція “Бюлетеня Вищої атестаційної комісії України”, 2000. – 64 с.

10. То Кен Сик. Системный подход к исследованию и управлению процессами устойчивого развития общества: [монография] / То Кен Сик. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. – 207 с.

11. Райзберг Б. А. Управление экономикой: учебник / Б. А. Райзберг, Р. А. Фатхутдинов. – М.: ЗАО «Бизнес-школа “Интел-Синтез”», 1999 – 528 с.

12. Ирина Черепанская, Валерий Кирилович, Артем Сазонов, Любомир Димитров. Системология построения измерительных систем с улучшенными характеристиками на примере прецизионной приборной системы измерения улов / Ирина Черепанская, Валерий Кирилович, Артем Сазонов, Любомир Димитров // Българско списание за инженерно проектиране. Машиностроителен факултет, Технически университет-София. – брой №41, месец юли, 2020. – Р.11–27

13. [http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0041\(2020\).pdf](http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0041(2020).pdf) – Название с экрана

14. Флейшман Б.С. Основы системологии. – М.: Радио и связь, 1982. – 199 с.

15. Кирилович В. А. Принципи автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій на відомому технічному базисі гнучких виробничих комірок // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2011. – № 3(58). – С. 33 – 47.

16. Иванов С. Ю. Проявление основных законов диалектики в научном познании // Вестник ОГУ. – 2008. – №7 (89). – С. 75–79.

17. Теоретические основы информатики. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://lib.ssga.ru/fulltext/UMK/%D0%B8%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0>

[%9A%D0%B0%D1%86%D0%BA%D0%BE/%D0%B7%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%82%D1%8C%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C%D1%8E/%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8/01%20%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F.pdf](#) – Название с экрана

18. Гончаров В.Н., Лобейко Ю.А. Научная информация и научные знания: социально-образовательный аспект // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-25. – С. 5720–5724; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=38497> (дата звернения: 04.08.2020).

19. Цымбал В.П. Информатика и индустрия информации. — Киев: Выща школа, 1989.

20. Тростников В.Н. Человек и информация. — М.: Наука, 1970.

21. Ильин Е. С. Интеллектуальная система анализа данных на основе нейронных сетей: дис. канд. техн. наук: 05.13.01 – “Системный анализ, управление и обработка информации” / Ильин Евгений Сергеевич. – Красноярск, 2004 – 174 с.

22. Храмов И. С. Геоинформационные модели и методы представления и оценки обстановки в ближней морской зоне с использованием искусственных нейронных сетей: дис. канд. техн. наук: 25.00.35 – “Геоинформатика” / Игорь Сергеевич Храмов. – Санкт-Петербург, 2020. – 217 с.

23. Родионов П. Е. Методика извлечения знаний в задачах анализа рядов динамики с использованием нейронных сетей: дис. канд. техн. наук: 05.13.17 – “Теоретические основы информатики” / Павел Евгеньевич Родионов. – Москва, 2003. – 169 с.

24. Bennett, C. L., Odom, C., Ben-Asher, M. (2013). Knee Angle Estimation based on IMU data and Artificial Neural Networks. 2013 29th Southern Biomedical Engineering Conference. doi: <https://doi.org/10.1109/sbec.2013.64>

25. Shrirao, N. A., Reddy, N. P., Kosuri, D. R. (2009). Neural network committees for finger joint angle estimation from surface EMG signals. *BioMedical Engineering OnLine*, 8 (1), 2. doi: <https://doi.org/10.1186/1475-925x-8-2>

26. Angel, A. D., Glavic, M., Wehenkel, L. Using Artificial Neural Networks to Estimate Rotor Angles and Speeds from Phasor Measurements. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.151.7413&rep=rep1&type=pdf> – Название с экрана

27. Zhang, J., Li, H., Lv, L., Zhang, Y. (2017). Computer-Aided Cobb Measurement Based on Automatic Detection of Vertebral Slopes Using Deep Neural Network. *International Journal of Biomedical Imaging*, 2017, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/9083916>

28. Di Noia, A., Hasekamp, O. P., van Harten, G., Rietjens, J. H. H., Smit, J. M., Snik, F. Et. al. (2015). Use of neural networks in ground-based aerosol retrievals from multi-angle spectropolarimetric observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8 (1), 281–299. doi: <https://doi.org/10.5194/amt-8-281-2015>

29. Otağ, I., Akkoyun, S., Taştumur, Y., Çimen, M. (2015). Boehler's Angle Estimations in Calcaneus Bone by Using Artificial Neural Networks. *Cumhuriyet Science Journal*, 36 (5), 57. doi: <https://doi.org/10.17776/csj.56855>

30. Manivannan, N., Neil, M. A. A. (2011). Automatic angle measurement of a 2D object using optical correlator-neural networks hybrid system. *Optical Pattern Recognition XXII*. doi: <https://doi.org/10.1117/12.883653>

31. Li, Y., Fu, P., Li, Z., Li, X., Lin, Z. (2015). Biaxial Angle Sensor Calibration Method Based on Artificial Neural Network. *Chemical Engineering Transactions*, 46, 361–366. doi: <http://doi.org/10.3303/CET1546061>

32. Fuzzy logic air/fuel controlle [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/US5524599> – Назва з екрана.

33. Черепанська І. Ю. Використання штучного інтелекту для керування подачею палива інжекторного двигуна / І. Ю. Черепанська, А. В. Гончаренко // Вісник Житом. держ. технол. уні-у. Серія “Технічні науки”. – Житомир : ЖДТУ. – 2014. – № 1 (68). – С. 3–11.

34. Чиркин С. Ю. Синтез управления двигателем внутреннего сгорания на основе экспериментальных данных: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. тех. наук.: спец. 05.13.06 “Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами в машиностроении” / Сергей Юрьевич Чиркин. – М. :, 2010. – 16 с.

35. Жученко А. І. Технології штучного інтелекту та основи машинного зору в автоматизації: теорія та практика. підручник для студентів, спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” всіх форм навчання / А. І. Жученко, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, Д. О. Ковалюк – КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 393 с.

36. Жариков О. Г. Экспертные системы в медицине / О. Г. Жариков, А. А. Литвин, В. А. Ковалёв // Медицинские новости. – 2008. – № 10. – С. 15–18. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mednovosti.by/journal.aspx?article=4013> – Название с экрана.

37. Современные разработки в области искусственного интеллекта. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aiportal.ru/articles/other/actual-developments.html> (По состоянию на 20.06.2016) – Название с экрана.

38. Современный искусственный интеллект. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/simplewuu/home/sovremennyj-iskusstvennyj-intellekt> (По состоянию на 20.06.2016) – Название с экрана.

39. Ларионов В. В США начали печатать самоходные маршрутки / В. Ларионов // Новости высоких технологий [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://hi-news.ru/technology/v-ssha-nachali-pechatat-samohodnye-marshrutki.html> (По состоянию на 20.06.2016) – Название с экрана.

40. SUNSPRING / Фильм, сценарий к которому написал искусственный интеллект. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://rutube.ru/video/b384979eab58c5a7f303aab834bc17ba/> – Название с экрана.

41. Артеменко Е. В. Актуальные вопросы государственной информационной политики по обеспечению информационной безопасности Украины / Е. В. Артеменко, В. С. Жорновой // Міжнародний Науковий Журнал Інтернаука. Серія: Юридичні науки. – №2 (7). – 2018. – С 7–12.

42. Чернышов, В.Н. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.

43. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. – К.: МАУП, 2003. – 368 с.

44. Саркисян С. А. Большие технические системы. Анализ и прогноз развития / С. А. Саркисян и др. – М.: Наука, 1977.

45. ДСТУ ISO/IEC 27001:2015 Інформаційні технології. Методи захисту системи управління інформаційною безпекою. Вимоги (ISO/IEC 27001:2013; Cor 1:2014, IDT)

46. Бондаренко М. Перспективы применения международного стандарта ISO/IEC 15408 в Украине / М. Бондаренко, Л. Скрышник, И. Горбенко, А. Потий // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – № 3. – 2001. [Електронний ресурс] – режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15319/1/03_p7.pdf – Название с экрана

47. Черепанська І. Ю. Планування, моделювання та верифікація процесів у гнучких виробничих системах. Практикум: навч.-метод. посібн. / І. Ю. Черепанська, В. А. Кирилович, А. Ю. Сазонов, Б. Б. Самотокін. – Житомир: ЖДТУ, 2015. – 285 с.

48. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: Підручник / Л. С. Ямпольський, П. П. Мельничук, Б. Б. Самотокін та ін. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 680 с.

49. Панов А. Ф. Системный подход к оценке эффективности

производства и качества продукции: [методические материалы и рекомендации] / А. Ф. Панов. – Житомир, 1977. – 46 с.

50. Бодров В. И. Математические методы принятия решений: [учеб. пособие] / В. И. Бодров, Т. Я. Лазарева, Ю. Ф. Мартемьянов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2004. – 124 с.

51. Дубов Ю. А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.

52. Орлов А. И. Основы теории принятия решений / А. И. Орлов. – М.: „Март”, 2002. – 51 с.

53. Орлов А. И. Теория принятия решений: [учебное пособие] / А. И. Орлов. – М.: „Март”, 2004. – 656 с.

54. Орлова И. В. Экономико-математические методы и модели / И. В. Орлова – М.: ЗАО „Финстатинформ”, 2000. – 136 с.

55. Щербаков, С.М. Имитационное моделирование экономических процессов в системе Arena: Учебное пособие / С.М. Щербаков. – Рост. гос. эконом. ун-т (РИНХ). – Ростов н/Д, 2012. – 128 с.

56. Zadeh L.A. Thinking Machines – a New Field in Electrical Engineering// Columbia Eng., –1950. –№ 3.

57. Латыпова Н. В. Фрактальный анализ: учеб. пособие. – Ижевск: Издательский центр “Удмуртский университет”, 2020. – 120 с.

58. Стариков А. Генетические алгоритмы — математический аппарат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://loginom.ru/blog/ga-math> (дата звернения 26.10.2021) – Название с экрана

59. Жученко А.І. Технології штучного інтелекту. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти за галузями знань 12 «Інформаційні технології», 14 «Електрична інженерія», 15 «Автоматизація та приладобудування» всіх форм навчання / А. І. Жученко, І. Ю. Черепанська, А. Ю. Сазонов, Д. О. Ковалюк, Я. Д. Ярош – Поліський національний університет. – Житомир: Поліський національний університет, 2021. – 272 с.

60. Irina Cherepanska, Elena Bezvesilna, Artem Sazonov, Sergey Nechai, Oleksandr Pidtychenko Development of artificial neural network for determining the components of errors when measuring angles using a goniometric software-hardware complex // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2018. – № 5/9 (95). – P.43-51

61. Лещенко В.П. Кислородные датчики / В.П. Лещенко. – М. : Легион-Автодата, 2003. – 112 с.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

F

fuzzy logic 126, 154

S

Soft Computing 125

A

Актуальність теми 12

Аспектний підхід 33

Атрибут 110

B

Безпосередня оцінка 67

варіаційний розмах 69

Висновки 28

G

Генетичний алгоритм 128, 182

Граф 102

E

Евристика 182

Експерт 59

Експертна оцінка 59

Експертне опитування 59

елементом системи 36

Емерджентність 42, 56

Емпіричне дослідження 10

З

Зворотній зв'язок 60

Змінна 110

I

Імітаційна модель 109

Імовірнісні обчислення 128

Інтервальна шкала 63

K

Керування 46

Кількісна оцінка 64

Коефіцієнт

варіації 70

конкордації 70

рангової кореляції Спірмена

70, 75

K

Комбінаторика 107

Концептуальний підхід 33

Критерій оптимальності 77, 86

M

Мета наукового дослідження 12

Метод

Дельфи 60

дослідження 22

медіан рангів 68, 73

середніх арифметичних рангів

68

сценаріїв 60

шкалювання 62

Мозковий штурм 60

М'які обчислення 125, 126

H

Наукова проблема 12

Наукове дослідження 9

Науковий результат 24

Нейрон 133

Нейронна мережа 127, 132, 137, 138

Неструктурована проблема 31

Нечітка логіка 126

Номінальна шкала 63

O

Об'єкт дослідження 13

Обмеження 86, 87

Оптимальне рішення 124

Оптимальний план 87

Оптимізаційна модель 86

P

Парне порівняння 66

Підсистема 37

Порядкова шкала 63

Пошук рішення 121

Практична цінність 26

Предмет дослідження 13

Прикладне дослідження 10

Принцип 53

автоматизації 53

агрегування 55

декомпозиції і композиції 56

емерджентності 56

ієрархічності 54

інваріантності 53

модульності 52

результативності 57

синергетичної інтеграції 58

системності 55

структурованості 55

цілісності 56

P

Ранг 68

Ранжування 66

Ресурс 111

Робастність 42

C

Середнє квадратичне відхилення 70

Симплексний метод 88, 119

Система 35, 36

абстрактна 40

безперервна 49

велика 45

відкрита 51

гібридна 125

детермінована 49

динамічна 46

дискретна 49

закрита 51

замкнута 51

ймовірнісна 49

керована 46

матеріальна 40

природна 41

проста 41

- складна 41
- статична 46
- стохастична 49
- штучна 41
- Системний
 - аналіз 29, 32, 33,
 - підхід 33, 34
- Системологія 52
- Ситуаційне моделювання 108
- Структурована проблема 31
- Структура системи 36
- Сукупний критерій (параметр) якості 77, 82

- T***
 - Тема наукового дослідження 11
 - Теоретичне дослідження 10
 - Топологія 108

- Транзакт 110

- Ф***
 - Формалізація 76
 - Фрактал 129
 - Фрактальний аналіз 128
 - Фундаментальне дослідження 9
 - Функція активації 135

- Ц***
 - Цільова функція 77, 86

- Ч***
 - Черга 111

- Ш***
 - Шкала 63
 - відношення 64

Ірина Юріївна Черепанська
Артем Юрійович Сазонов

Сучасні інформаційні технології та системний аналіз у наукових дослідженнях

Навчальний посібник

для здобувачів освітнього ступеня доктора філософії
спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

Відповідальний редактор *Ю.В. Киричук*

Редактори *І. Ю. Черепанська*

Комп’ютерний набір і верстка *І. Ю. Черепанська*
А. Ю. Сазонов

Макетування *А. Ю. Сазонов*

Підписано до друку ***.**.20*** р. Формат 60×84 1/16 Папір офс.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. *****. Тираж 200 екз. Замовлення № ******

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб’єктів видавничої справи
Серія ******* № ******* від ****.***.****** р.