Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня доктора філософії
за освітньо-науковою програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 004.9:658.512.4:681.5
І-74

Укладачі: *Вислоух Сергій Петрович*, кандидат технічних наук, доцент.
Антонюк Віктор Степанович, доктор технічних наук, професор
Стельмах Наталія Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент.
Волошко Оксана Вячеславівна, старший викладач.

Рецензенти: *Богдан Галина Анатоліївна* кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний
редактор: *Тимчик Григорій Семенович* доктор технічних наук, професор

Гриф надано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського
(протокол №8 від 04.06.2026 р.)
за поданням Вченої ради факультету робототехніки та приладобудування
(протокол № 2/26 від 25.05.2026 р.)

І-74 Інформаційні технології в автоматизованому виробництві. [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня доктора філософії за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. П. Вислоух, В. С. Антонюк, Н. В. Стельмах, О.В. Волошко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 304 с

Навчальний посібник «Інформаційні технології в автоматизованому виробництв» містить результати наукових досліджень, що полягають в підвищенні ефективності технологічної підготовки виробництва на основі використання сучасних інформаційних технологій, можливостей методів багатовимірного статистичного аналізу, математичного моделювання й оптимізації.

Подано методики підвищення інформативності початкової інформації під час розв'язання технологічних задач, використання методів класифікації та розпізнавання образів, математичного моделювання й оптимізації. Розглянуто автоматизовані системи моделювання й оптимізації процесу виготовлення деталей приладів та автоматизованого проектування технологічних процесів складання виробів.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів і аспірантів вищих навчальних закладі

УДК 004.9:658.512.4:681.5

Реєстр. № НП 25/26-483. Обсяг 14,0 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© С. П. Вислоух, В. С. Антонюк, Н. В. Стельмах, О.В. Волошко,2026
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

ЗМІСТ 3
ВСТУП 6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ В ПРИЛАДО- ТА МАШИНОБУДУВАННІ 9
1.1. Сучасні погляди на інформаційну технологію і її вплив на життєвий цикл виробів 9
1.2. Вимоги сучасного виробництва до автоматизації технологічного проектування 12
1.3. Технологічний зміст функціональних залежностей автоматизованого проектування 14
1.4. Математичне моделювання об'єктів технологічних систем 18
1.5. Математичне моделювання технології складання виробів 32
Питання для самоконтролю 34
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ РОЗВЯЗАННІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ 36
2.1. Підвищення інформативності початкової інформації при розв'язанні технологічних задач 36
2.1.1. Зниження розмірності інформаційних масивів методами факторного аналізу 37
2.1.2. Зниження розмірності інформаційних масивів методом компонентного аналізу 43
2.1.3. Багатовимірне шкалування 52
2.2. Класифікація та розпізнавання образів в задачах технологічної підготовки виробництва 64
2.2.1. Кластерний аналіз технологічної інформації 65
2.2.2. Дискримінантний аналіз технологічної інформації 78
2.2.3. Використання методів дискримінантного аналізу для дослідження технологічних характеристик конструкційних матеріалів 82
2.2.4. Класифікація шляхом зниження розмірності 89
Питання для самоконтролю 95

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ 98
3.1. Основи побудови математичних моделей 98
3.1.1. Декомпозиція технологічних об’єктів 100
3.2. Чисельні методи моделювання 103
3.2.1. Інтерполяція функцій 103
3.2.2. Апроксимація функцій методом найменших квадратів 107
3.3. Експериментально-статистичні методи побудови математичних моделей 110
3.3.1. Планування експериментів 111
3.3.2. Регресійний аналіз 115
3.4. Моделювання параметрів з використанням методів теорії подібності та аналізу розмірностей 118
3.5. Фрактальний аналіз технологічної інформації 128
3.6. Індуктивні методи самоорганізації моделей 138
3.6.1. Синтез математичних моделей за допомогою методів групового врахування аргументів 138
3.6.2. Нечіткий метод групового врахування аргументів 144
3.6.3. Використання нечіткого методу групового врахування аргументів для моделювання та прогнозування технологічних параметрів 148
3.7. Моделювання технологічних параметрів шляхом використання штучних нейронних мереж 155
Питання для самоконтролю 175
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ 179
4.1. Метод опуклого нелінійного математичного програмування 180
4.2 Метод направленого випадкового пошуку з самонавчанням 182
4.3 . Метод стохастичного математичного програмування 184
4.4. Багатокритеріальна оптимізація технологічних параметрів 190
Питання для самоконтролю 199
РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ 202
5.1. Розробка інформаційної моделі деталі 203

5.1.1. Аналіз інформаційних зв’язків у системах технологічного проектування 203
5.1.2. Формалізація опису оброблюваної деталі 210
5.2. Розробка структурної схеми інформаційної моделі деталі 214
5.3. Розробка методу дослідження інформаційної моделі деталі 217
5.4. Математичне та програмне забезпечення автоматизованої системи проектування технології виготовлення корпусних деталей 219
Питання для самоконтролю 234
РОЗДІЛ 6 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ РОБІТ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ 237
6.1. Технологічні основи автоматизації проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні 237
6.1.1. Задачі, розв’язувані при автоматизації проектування технології механоскладальних робіт 237
6.1.2. Формалізація процесу проектування технології складання виробів приладобудування 240
6.2. Технологічні особливості складання виробів приладобудування 244
6.2.1. Класифікація та групування виробів приладобудування 245
6.2.2. Створення інформаційної моделі виробу 246
6.3. Моделювання технології складання приладів 248
6.3.1. Інформаційні зв’язки в технологічних процесах складання виробів приладобудування 248
6.3.2. Алгоритм технологічного поділу складальної одиниці на складові елементи 256
6.3.3. Формування послідовності складання виробу 258
6.4. Автоматизована система проектування технології складання виробів приладобудування 262
Питання для самоконтролю 290
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 294

ВСТУП

Проблема підвищення ефективності приладобудівного виробництва гостро ставить задачу покращення результатів та скорочення строків технологічної підготовки виробництва за рахунок створення погресивних технологічних процесів виготовлення приладів. Якість розв'язання задач технологічної підготовки суттєво залежить від постановки задач, методів їх розвязання та початкової інформції для їх рішення. Тому актуальною є проблема ророзробки наукових підходів до обробки технологічної інформації та обгрунтованого вибору методів розвязання різноманітних технологічних задач.

Нові можливості підвищення якості розв'язання задач технологічної підготовки виробництва відкриваються завдяки цілеспрямованій обробці значних масивів технологічної інформації з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу, що дозволяє максимально врахувати такі різноманітні параметри як характеристики оброблюваних і інструментальних матеріалів, особливості, умови та засоби виробництва, так і загальний життєвий цикл розроблених та виготовлених приладів і машин. Крім того, обґрунтований вибір методів розв'язання технологічних задач значно покращує вихідні параметри виготовлених виробів та їх життєвий цикл.

Існуючі методи розв'язання задач технологічної підготовки виробництва характеризуються використанням обмеженої початкової технологічної інформації, її однобічністю та суб'єктивністю вибору, застосуванням методики, що не у всіх випадках дозволяють отримати оптимальні методи, умови та засоби виготовлення приладів, раціональні технологічні процеси, які не завжди відповідають заданим вимогам. Задачі технологічної підготовки виробництва недостатньо формалізовані, зазвичай відсутні адекватні математичні моделі, що описують вихідні технологічні параметри та показники процесів виготовлення деталей та складання виробів, на обмеженому рівні розв'язуються задачі параметричної та структурної оптимізації приладо- та машинобудівного виробництва. Відсутнє обґрунтування вибору початкової інформації при

математичному моделюванні, вибору ефективних методів отримання імітаційних та математичних моделей параметрів та показників технологічних процесів, що погіршує результати автоматизованого проектування. Використання методів параметричного та структурного моделювання обмежується відомими не завжди ефективними методами. Для розв'язання різноманітних задач технологічної підготовки виробництва не використовуються сучасні методи теорії інформації, теорії масового обслуговування, розпізнавання образів, проектування інтелектуальних технологічних систем тощо. Задачі технологічної підготовки виробництва та методи їх розв'язання вивчені не в повній мірі і не систематизовані. Недостатньо досліджені можливості сучасних методів імітаційного та математичного моделювання, а також відсутнє наукове обґрунтування вибору використовуваних в даний час методів розвязання задач технологічної підготовки виробництва.

Це обумовлює необхідність створення методики обробки технологічної інформації шляхом використання багатовимірного статистичного аналізу з метою максимального врахування різнобічних параметрів та показників відповідної технологічної задачі проектування, а також обґрунтування доцільності використання сучасних методів імітаційного та математичного моделювання, методів параметричної й структурної оптимізації.

Систематизація задач технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва, обґрунтування вибору початкової інформації при розв'язанні цих задач, обґрунтування та вибір ефективних методів формалізації вказаних задач й методів їх розв'язання, в яких поєднувались би в комплексі всі етапи виготовлення приладів та їх життєвого циклу є проблемою актуальною і своєчасною.

Вирішення вказаної проблеми можливо лише на основі вивчення задач технологічної підготовки виробництва та вимог до їх розв'язання, а також дослідження сучасних методів обробки інформації, імітаційного та математичного моделювання й оптимізації параметрів та характеристик

технологічних систем з широким використанням ефективних методів системного аналізу, розпізнавання образів, теорії множин, алгебри логіки, теорії графів, математичного програмування, проектування складних інтелектуальних систем тощо.

Результати вивчення цієї дисципліни є базою для створення автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва, проектування прогресивних технологічних процесів, науково обґрунтованого нормування технологічних процесів виготовлення деталей та складання приладів, а також організації роботи автоматизованих виробничих технологічних систем в приладо- та машинобудуванні.

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНИЙ СТАН ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ В ПРИЛАДО- ТА МАШИНОБУДУВАННІ

1.1. Сучасні погляди на інформаційну технологію і її вплив на життєвий цикл виробів

Сучасні приладобудівні та машинобудівні виробництва потребують використання результатів сучасних науково-технічних розробок, які базуються на науковоємних високоефективних (високих) технологіях. Високі технології можливі на основі реалізації ідей CALS – технологій, що передбачають інформаційну підтримку всього життєвого циклу виробів. Тому важливим є інтеграція технологічних даних при використанні інформаційної підтримки життєвого циклу виробів (ІПВ), тобто CALS – технологій, яка вимагає високого рівня їх інформатизації та математичного моделювання [1, 4].

Сучасна технологія повинна відповідати таким вимогам [8]:

а) високий ступінь розчленованості процесу на стадії;

б) системна повнота (цілісність) процесу, який повинен включати весь набір елементів, що забезпечують необхідну завершеність дій людини в досягненні поставленої мети;

в) регулярність процесу і однозначність його стадій, що дозволяють застосувати середні величини в характеристиці цих стадій, отже, їх стандартизацію і уніфікацію.

Властивості технологій визначають характеристики технологічних процесів [7, 8]:

а) поділ процесу на внутрішні, взаємозв'язані етапи, стадії і операції, при якому прагнуть забезпечити оптимальну або близьку до оптимальної динаміку розвитку процесу, а також визначити раціональні межі вимог до персоналу, який діятиме за даною технологією;

б) координоване і поетапне виконання дій, що направлені на досягнення шуканого результату, причому послідовність цих дій повинна базуватися на внутрішній логіці функціонування і розвитку даного процесу;
в) однозначність виконання включених в технологію процедур і операцій, що є неодмінною і вирішальною умовою досягнення результатів.

Для однозначності виконання заданих технологією процедур і операцій виключно важливі норми і нормативи, оскільки вони визначають параметри кожної окремої дії і є логічно обумовленою основою при розробці технологій.

Створення складних кібернетичних систем, а також розвиток методів і засобів аналізу та реалізації програмного і інформаційного забезпечення їх функціонування зумовили усвідомлення існування і розвитку нового вигляду технологій: технології програмування і інформаційних технологій.

Таким чином, основоположною для довільної технології є наявність доцільного процесу, що штучно реалізовується та поділяється на операції, і засобів його здійснення.

Життєвий цикл (ЖЦ) процесу (об’єкта) є базою для побудови технології в нашій предметній області. Природно, ЖЦ не може існувати без технології. Технологія, очевидно, є мета системою по відношенню до ЖЦ, коли виникає необхідність і існує можливість керування технологічними процесами. Між різними технологіями можливі ієрархічні відносини між обслуговуваними ними ЖЦ. Тоді технологія вищого рівня виступає як зовнішнє середовище по відношенню до „нижче розташованих” технологій і визначає їх характеристики.

Як показує досвід розвитку промислових технологій, правильному проектуванню технологічних процесів сприяє розгляд конкретної технології в рамках деякої більш загальної технології. В процесі розв’язання задач на комп’ютері можна виділити такі основні етапи: формалізована постановка завдання, її алгоритмізація і визначення початкових даних; програмування; збір і підготовка початкових даних; виконання програми на комп’ютері; аналіз і інтерпретація результатів.

Між технологіями може існувати і причинно-наслідковий зв'язок типу „якщо..., то...”. Особливий інтерес в цьому відношенні має аналіз відомої тріади етапів ЖЦ виробів (і взагалі будь-яких об'єктів штучного походження) „проектування – виготовлення – використання”. Ця тріада входить в узагальнену структуру технологій рекурсивної, що є віддзеркаленням ієрархічної структури складного виробу, наприклад, проектування – виготовлення – використання деталі, що входить в складальну одиницю, яка в свою чергу використовується в спроектованому складному виробі. Причинно-наслідкові відношення в даному випадку означають, що, з одного боку, проектні рішення, що прийняті при розробці якої-небудь складальної одиниці, впливають на виготовлення (складання) виробу та його експлуатацію, з іншого боку, спроектована технологія експлуатації виробу визначає характеристики технології його створення. Необхідно відзначити, що технологічність виготовлення окремої деталі не забезпечує технологічності виготовлення виробу і тим більше не гарантує технологічності його експлуатації. Технологічною слід вважати таку конструкцію, яка не тільки задовольняє пред'явленим до неї експлуатаційним вимогам, але і забезпечує раціональне використання виробничого устаткування і матеріалів, застосування високопродуктивного процесу; відрізняється конструктивною і технологічною спадкоємністю деталей, складальних одиниць, окремих складових; може бути освоєна в короткі терміни при мінімальних витратах праці та матеріальних засобів [8].

Інформаційну технологію в даному контексті можна вважати технологією використання програмно-апаратних комплексів обчислювальної техніки (ОТ) в нашій предметній області. Це дає можливість виявити наступні основні характеристики ІТ [4]:

а) предметом обробки (процесу) є дані;

б) метою процесу є отримання інформації;

в) засобами здійснення процесу є програмні, апаратні і програмно-апаратні обчислювальні комплекси;

г) процеси обробки даних поділяються на операції, відповідно до предметної області;

д) вибір керуючих дій на процеси повинен здійснюватися особами, що ухвалюють рішення (ОУР);

е) критерієм оптимізації процесу є своєчасність доставки інформації користувачеві, її надійність, доступність, повнота.

Поняття інформації можна тлумачити як деяку сукупність відомостей (повідомлень), що визначають міру наших знань про ті або інші події, явища, факти та їх взаємозв'язок. Таке визначення підкреслює величезне різноманіття змісту інформації, що виявляється в найрізноманітніших фізичних, економічних і соціальних явищах.

1.2. Вимоги сучасного виробництва до автоматизації технологічного проектування

Для сучасного приладо- та машинобудівного виробництва характерне прагнення до отримання найбільших прибутків і до постійного оновлення асортименту продукції, що випускається. Таке виробництво часто називають багатоцільовим. Вимоги багатоцільового виробництва можуть бути реалізовані як при його автоматизації, яка охоплює автоматизацію технологічної підготовки, так і при виробництві продукції [23, 29].

При розробці систем автоматизації проектування технології приладо- та машинобудування повинні бути враховані наступні умови їх функціонування:

а) конструкція виробу часто не має аналогів і характеризується складною формою і високими вимогами до якості;

б) етапність технологічної підготовки виробництва: аналіз конструкції з погляду її виготовлення і оптимізації технології, отримання проекту технології, моделювання виготовлення;

в) зміна номенклатури виробів;

г) зміна структури виробничої системи;

д) зміна режиму випуску виробів.

Ці умови визначають вимоги до систем автоматизації проектування технології приладо- та машинобудівного виробництва, виконання яких забезпечує ефективність їх роботи. Системи автоматизації проектування повинні забезпечити:

а) отримання проекту для різних (включаючи нові) конструкторських рішень, які можна здійснити засобами виробничої системи;

б) функціонування на різних етапах підготовки виробництва (аналіз креслень конструкції, моделювання виготовлення, влагодження технологічних ланок підприємства, визначення правил виготовлення для кожного конкретного завдання на кожному робочому місці);

в) розв’язання задач проектування з урахуванням факторів, пов'язаних з системами автоматизації рішення задач організації виробництва і управління, такими, як: 1) адаптація технології і зміна виробничих умов (гнучка технологія);2) забезпечення скорочення часу налагоджень і переналагоджень засобів виготовлення в виробничій системі;3) оптимальне завантаження устаткування; 4) надійність технологічних рішень для підвищення загальної надійності виробничої системи;5) сумісність з іншими системами проектування і конструювання виробів.

Системи, що мають перераховані вище властивості, є багатофункціональними системами (або САПР ТП багатофункціонального призначення). Використання цих САПР для процесів виготовлення деталей та складання виробів дає можливість не тільки скоротити час технологічної підготовки виробництва, але і забезпечити значну економію матеріалів за рахунок зниження браку при виготовленні. Все це дає можливість до початку виготовлення виробів оцінити якість розробленої технології. САПР ТП багатофункціонального призначення може бути ефективним засобом активізації діяльності інженера, сприяючи підвищенню його продуктивності, економії матеріалів і засобів, підвищенню якості продукції.

Автоматизація проектування в приладо- та машинобудівному виробництві – частина комплексної проблеми автоматизації інженерної праці у

всіх сферах функціонування сучасної виробничої системи. Отже, при створенні системи автоматизації проектування повинні бути враховані її зв'язки в загальному комплексі автоматизації інженерної діяльності у виробничому циклі

1.3. Технологічний зміст функціональних залежностей автоматизованого проектування

При реалізації технологічного процесу поставлена задача отримання виробу, що задовольняє потребам користувача при мінімальних витратах на його виготовлення.

Технологічний процес визначається законами функціонування виробництва і технології. Закони функціонування приладо- та машинобудівного виробництва розглядають процес створення споживчої продукції в системі відповідного підприємства, вони основані на законах управління і економіки. Закони управління розглядають поведінку виробничої системи і її елементів в відповідному виробництві. Закони економіки визначають виробничі відносини в системі приладо- та машинобудівного підприємства, а закони виготовлення – процеси якісної зміни предметів від початкового їх стану до кінцевого, що встановлені споживчими вимогами [25].

Закони виготовлення, функціонування виробництва (закони виробництва), закони управління і економіки визначають методичну основу проектування, яка встановлює послідовність дій, що призводять до отримання результатів і об'єктів, над якими проводять дії. Велика кількість законів і закономірностей, що впливають на створення технології, створює ілюзію наявності добре розвиненої теорії.

В той же час емпіричне об'єднання різних областей знань через вивчення впливу на поетапний стан продукту характеризується слабким взаємозв'язком цих знань, оскільки в даній ситуації єдність системи знань не обумовлена самою зміною продукту, що виготовляється, тобто процесами, що вивчаються в технології приладо- та машинобудування.

Недостатність знань технології приладо- та машинобудування стає гальмом не тільки в вирішенні деяких задач, але і в розвитку технології, що завдає зрештою великого економічного збитку виробництву, оскільки деколи досвід попередніх поколінь інженерів не дозволяє вибрати якнайкращий шлях виготовлення продукції і потрібні дорогі експерименти налагодження технологічних комплексів, що ведуть до втрати праці, часу, засобів.

Процес проектування та його методика з погляду автоматизації проектування підкоряються логіці, яка відображає специфіку технології приладо- та машинобудування і повинна враховувати емпіричні знання про виготовлення. Система знань основана на традиційній неформальній логіці. У основі дедуктивної побудови рішення задач проектування технології лежать фундаментальні положення, що мають принциповий характер і що є початковими посилками логічних висновків традиційного проектування.

Ці фундаментальні положення технології характеризують результати проектування та обмеження, в яких цей проект повинен бути описаний.

Фундаментальні і конкретні положення технології всіх рівнів і логіка традиційного проектування складають основу методичних положень проектування, використовуваних в даний час. Оскільки ці методичні положення класифіковані під конкретні завдання, конкретні проектні рішення і технологічні ситуації, то для створення багатофункціональних автоматизованих систем проектування потрібна побудова нової методики проектування, що основана на логіці проектування, та не пов'язана з конкретними рекомендаціями.

Традиційне проектування технології, проектування технологічних процесів і засобів оснащення, розглядає класифікацію законів проектування на основі вимог до проектованого об'єкту; це дозволяє в цілому встановити порядок отримуваних рішень. Параметричне представлення технології не несе повною мірою інформації про проект. Результат проектування технології виражається в технологічних картах і кресленнях засобів оснащення технологічного процесу.

Опис стану елементів виготовленого об'єкту та умов виконання дій, що ведуть до отримання необхідного виробу, елементів його конструкції та умов функціонування конструкції, містить як параметричні дані, так і дані про те, що ці параметри характеризують.

Таким чином, задача проектування і зрештою автоматизація процесу проектування не можуть розглядатися як розрахункове завдання визначення параметрів проектованого об'єкту. Задача проектування розглядається в основі як задача якісного характеру, для якого значну, якщо не головну, роль відіграє питання вивчення взаємодії елементів проектованого об'єкту між собою і визначення взаємодії проектованого об'єкту із зовнішнім середовищем. Визначення параметрів є задачею визначення властивостей проектованого об'єкту або його елементів, що виражені за допомогою кількісних значень (розміру, маси, часу тощо.).

Методологія розв’язання задач проектування технології приладо- та машинобудування є такою, що визначає автоматизацію проектування, на основі якої може бути побудована загальна теорія розв’язання задач автоматизації технологічного проектування. Основною методологічною проблемою є взаємозв'язок змісту процесу проектування технології з абстрактним його описом, придатним для програмування. У вирішенні цієї проблеми використовують метод абстрагування.

Абстрагування припускає розкладання явища на його елементи, виділення з них загальних і істотних елементів відношень проектування. Загальними є елементи, що присутні в будь-якій технології, і їх взаємозв'язки, що характеризують будь-який процес проектування.

Проблема співвідношення абстрактного і конкретного може бути вирішена за допомогою побудови системи моделей з різним рівнем абстракції. На першому рівні абстракції будується модель основних залежностей виходу від входу в категоріях теорії систем. На другому рівні – математична модель процесу проектування технології, що розглядає кібернетичні властивості

процесу проектування. На третьому рівні – логіко-математична модель, як складова основи математичного опису процесу проектування.

Вирішення вказаної методологічної проблеми складає основу прикладної теорії автоматизації процесів технологічного проектування, що, у свою чергу, визначає теорію синтезу багатофункціональних систем проектування.

Прикладна теорія автоматизації проектування технології приладо- та машинобудування є основою теорії синтезу багатофункціональних систем проектування. Вона має логічну організацію, що основана на загальних для всіх випадків приладо- та машинобудування закономірностях проектування технології і самої технології. Узагальнення явищ, що вивчаються, може бути виконане на основі абстрагування, що дозволяє виявити нові сторони відношень в проектуванні, а саме взаємодії, що і створило передумови для пізнання закономірностей проектування технології.

Вивчення механізму відношень засобами математичної логіки дозволяє розкрити специфіку побудови цільових установок технології, її структурних елементів, проектних рішень. Вивчення властивостей структур засобами логіки і логічного числення дозволяє пов'язати в єдину систему знань різні технології приладо- та машинобудування. Зрештою, отримані конкретні знання утворюють теорію про відношення в проектуванні технології, умови їх виконання, правила їх перетворення з метою отримання проекту.

Теорія автоматизації проектування технології може бути побудована на основі вивчення завдань технології з погляду їх внутрішнього змісту і визначення закономірностей їх рішення і взаємозв'язку, узагальнення яких можливо математичними засобами. Сутність технологічних завдань повинна бути визначена шляхом розгляду взаємодій, вигляд і тип яких можуть бути описані через відношення і умови їх здійснення.

На першому етапі визначаються загальні функціональні залежності виходу (проектного рішення) від входу (початкових даних і ситуацій), На другому етапі визначаються відношення об'єктів проектування на предметних областях. На третьому етапі визначаються процедури побудови елементів

проекту і проекту в цілому. Зрештою побудовані функції описують цільові установки процесу проектування засобами математичної логіки і характеризуються взаємозв'язком один з одним. Вигляд і області існування цих функцій можуть бути визначені із законів технології і проектування.

Теорія автоматизації проектування технології складається з двох основних частин: формалізованої технології приладо- та машинобудування і формальної теорії процесу побудови проекту. Формальна теорія процесу побудови проекту оперує процедурами двох типів: процедурами визначення правильності відношень, основаних на аналізі взаємодії об'єктів технології і виробництва, що дозволяють визначити елементи проекту, і процедурами формування проекту і його частин, причому правильність процедур формування проекту визначена законами тієї, що виводиться, математичної логіки.

Процедури формування проекту технології, що підкоряються закону зміни якісного стану виготовлення деталей або вузлів, забезпечують поетапну побудову елементів проекту і можливість оцінки їх з погляду різних критеріїв (якісних, вартісних тощо).

Таким чином, повинне бути побудоване математичне числення проектування технології. Числення спеціального вигляду містить початкові формули, що описують взаємодії об'єктів технології, і формули, що виводяться, описують проектні рішення, а також правила виведення і утворення формул, прийняті в математичній логіці. Процес виведення описує процес розв’язання задач проектування технології незалежно від змісту початкових даних і легко програмується. Використання логічного числення дозволяє створити системи проектування з принципово новими властивостями універсальності, багатофункціональності та комплексності.

1.4. Математичне моделювання об’єктів технологічних систем

Вимоги до математичних моделей і їх класифікація. Математичні моделі (ММ) технологічних процесів (ТП) і його елементів представляються у

вигляді системи математичних співвідношень, що описують з необхідною точністю об'єкт, що вивчається, і його поведінку в виробничих умовах. При побудові ММ використовують різні математичні засоби опису об'єкту – теорію множин, теорію графів, теорію ймовірностей, математичну логіку, математичне програмування, диференціальні або інтегральні рівняння тощо [10, 13, 18, 19, 20].

До математичних моделей пред'являють вимоги високої точності, економічності і універсальності. Вимоги до точності, економічності і ступеня універсальності ММ є часто суперечливими. Тому необхідно знайти вдале компромісне рішення.

Ступінь універсальності ММ характеризує повноту відображення в моделі властивостей реального об'єкту. Проте ММ відображає лише деякі властивості об'єкту. Так, більшість ММ використовуються при функціональному проектуванні, наприклад, знаходження оптимальних режимів різання, розрахунок продуктивності тощо. При цьому не завжди потрібно, щоб ММ описувала всі властивості об'єкту, як, наприклад, геометрична форма складових його елементів.

Точність ММ оцінюється ступенем співпадіння значень параметрів реального об'єкту і значень тих же параметрів, розрахованих за допомогою оцінюваної ММ.

Економічність ММ характеризується витратами обчислювальних ресурсів (витратами машинного часу й оперативної пам'яті) на її реалізацію.

Основні ознаки класифікації і типи ММ, що використовуються в задачах проектування, наведено в таблиці 1.1.

За характером властивостей об'єктів їх ММ поділяють на структурні і функціональні. Структурні ММ призначені для відображення структурних властивостей об'єкту, вони поділяються на топологічні і геометричні.

Опис математичних співвідношень на рівнях структурних, логічних і кількісних властивостей приймає конкретні форми в умовах певного об'єкту.

Наприклад, множину параметрів, що впливають на вибір швидкості різання при різних методах обробки, можна представити у вигляді

$$V = \{T_i, m, t, s, d, B, c_v, k_v, x_v, y_v, z_v, r_v\}, \quad (1.1)$$

де T_i – період стійкості інструменту, хв.;

m – показник відносної стійкості інструменту;

t – глибина різання, мм;

s – подача, мм/об (мм/зуб, мм/об., мм/хв.);

d – діаметр оброблюваної поверхні або діаметр інструменту, мм;

B – ширина оброблюваної поверхні, мм;

c_v– коефіцієнт, що характеризує умови обробки;

k_v– поправочний коефіцієнт на швидкість різання;

x_v, y_v, z_v, r_v– відповідні показники степенів.

*Таблиця 1.1.***Класифікація математичних моделей та їх ознаки**

Ознака класифікації	Математичні моделі
Характер властивостей об'єкту, що відображаються	Структурні; функціональні
Належність до ієрархічного рівня	Мікрорівня; макрорівня; метарівня
Ступінь деталізації опису всередині одного рівня	Повні; макромоделі
Спосіб представлення властивостей об'єкту	Аналітичні; алгоритмічні; імітаційні
Спосіб отримання моделі	Теоретичні; емпіричні

Логічні співвідношення між наведеними вище параметрами і швидкістю різання V мають вигляд:

$$V = T_i \wedge m \wedge c_v \wedge k_v[(t \wedge x_v) \vee (s \wedge y_v) \vee (d \wedge z_v) \vee (B \wedge r_v)],$$

причому T_i, m, c_v і k_v завжди істинні, а дійсні значення інших змінних залежать від методу обробки різанням.

Функціональні ММ призначені для відображення фізичних або інформаційних процесів, що протікають в технологічних системах при їх

функціонуванні. Зазвичай функціональні ММ представляються системою рівнянь, що описують фазові змінні, внутрішні, зовнішні і вихідні параметри.

За належністю до ієрархічного рівня ММ можуть бути на мікрорівні, макрорівні і метарівні. Особливістю ММ на мікрорівні є відображення фізичних процесів в безперервному просторі і часі. За допомогою диференціальних рівнянь в часткових похідних розраховуються поля механічних напруг і деформацій.

На макрорівні використовують укрупнену дискретизацію простору за функціональною ознакою, що приводить до представлення ММ на цьому рівні у вигляді звичайних диференціальних рівнянь. У цих моделях є дві групи змінних – незалежних (час) і залежних (фазових). Такими змінними є сили і швидкість переміщення в механічних системах, напруга і сила струму в електричних системах тощо.

Математичні моделі на метарівні описують укрупнено об'єкти (технологічні системи та ін.), що розглядаються. Як математичний апарат тут використовують звичайні диференціальні рівняння, теорію масового обслуговування, елементи дискретної математики тощо.

Теоретичні моделі будують шляхом вивчення закономірностей виконання процесів. На відміну від формальних моделей (наприклад, емпіричних, таких, що описують режими різання) вони в більшості випадків більш універсальні і справедливі для широких діапазонів зміни вхідних параметрів. Теоретичні моделі бувають лінійними і нелінійними, а, в залежності від потужності множини значень змінних, їх поділяють на безперервні і дискретні. При технологічному проектуванні найбільш поширені дискретні моделі, змінні яких є дискретними величинами, а множина рішень – рахункового типу. Розрізняють також моделі динамічні і статичні. В більшості випадків технологічного проектування використовують статичні моделі, рівняння яких не враховують інерційність процесів в об'єкті.

У повній ММ враховують зв'язки всіх елементів проектованого об'єкту, наприклад, маршрутна технологія. Макро- математичні моделі відображають

значно меншу кількість між елементних зв'язків. Аналітичні ММ – це функціональні моделі (теоретичні або емпіричні), вони, як правило, використовуються при параметричній оптимізації технологічних задач. Алгоритмічна ММ представляється у вигляді алгоритму. Імітаційна модель є алгоритмічною, тобто такою, що відображає поведінку досліджуваного об'єкту в часі при заданих зовнішніх діях на об'єкт (наприклад, процес підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК та для роботизованого складання).

Вибір типу математичного моделювання, найбільш ефективного в умовах конкретної задачі, визначається її технологічною суттю, формою представлення початкової технологічної інформації, загальною метою дослідження тощо. Обмеження, що входять в модель, визначають область допустимих рішень задачі.

В залежності від складності задачі використовують різні принципи побудови моделей. Часто виникає необхідність розробки менш точної моделі, але такої, що буде більш корисною для практики. Виникають дві задачі: з одного боку, потрібно розробити модель, на якій найпростіше отримати чисельне розв’язання, а з іншого боку – забезпечити максимально можливу точність моделі. З метою спрощення моделі використовують такі прийоми, як виключення змінних, зміна характеру змінних, зміна функціональних співвідношень між змінними (наприклад, лінійна апроксимація), зміна обмежень (їх модифікація, поступове введення обмежень в умову задачі тощо). Моделі, що є ефективним засобом дослідження структури задачі, дозволяють виявити принципово нові стратегії.

Методика отримання математичних моделей. У загальному випадку процедура отримання математичних моделей елементів технологічних процесів включає наступні операції.

1. Вибір властивостей об'єкту, що підлягають віддзеркаленню в моделі. Цей вибір оснований на аналізі можливих застосувань моделі і визначає ступінь універсальності ММ.

2. Збирання початкової інформації про вибрані властивості об'єкту. Джерелами відомостей можуть бути досвід і знання інженера, що розробляє модель, науково-технічна література, перш за все довідкова, описи прототипів – наявних ММ для елементів, близьких за своїми властивостями до досліджуваного, результати експериментального вимірювання параметрів тощо.

3. Синтез структури ММ. Структура ММ є загальним виглядом математичних співвідношень моделі без конкретизації числових значень параметрів, що фігурують в них. Структуру моделі можна представити також в графічній формі, наприклад у вигляді еквівалентної схеми або графа. Синтез структури є найбільш відповідальною і з найбільш трудоємною операцією, що піддається формалізації.

4. Розрахунок числових значень параметрів ММ. Ця задача ставиться як задача мінімізації похибки моделі заданої структури.

5. Оцінка точності (ОТ) і адекватності ММ. Для оцінки точності бажано використовувати значення вихідних величин, які не фігурували при розв’язанні задачі.

Реалізація функціональних ММ на ОТ передбачає вибір чисельного методу розв’язання рівнянь і перетворення рівнянь відповідно до особливостей вибраного методу. Кінцевою метою перетворень є отримання робочої програми аналізу у вигляді послідовності елементарних дій (арифметичних і логічних операцій) для комп’ютера, що реалізовуються командами. Всі вказані перетворення результатною ММ в послідовність елементарних дій комп’ютер виконує автоматично за спеціальними програмами.

Структурні або **структурно-логічні моделі** згідно ДСТУ 3974-2000 на табличні, мережеві і перестановочні, які визначаються рядками булевої матриці.

У табличній моделі кожному набору властивостей відповідає єдиний варіант проектованого об'єкту, тому табличні моделі використовують для пошуку стандартних, типових або готових проектних рішень. Моделі решти

класів застосовують для отримання типових, уніфікованих і індивідуальних проектних рішень за наявності їх варіантів і необхідності оптимізації рішення.

Структура елементів мережевої моделі описується орієнтованим графом, що не має орієнтованих циклів. У цій моделі може міститися декілька варіантів проектованого об'єкту, проте у всіх варіантах зберігається незмінним співвідношення порядку між вхідними елементами.

Співвідношення порядку між елементами проектованого об'єкту в перестановочних моделях зазвичай задається графом, що містить орієнтовані цикли, причому всі варіанти об'єктів, що проектуються за перестановочними моделями, розрізняються порядком між елементами, що в них входять. Тут об'єктом проектування може бути технологічний процес, операція або технологічний перехід. Якщо розглядати технологічний процес як об'єкт проектування, то операції тут будуть елементами; при проектуванні операції елементами є технологічні переходи.

Мережева модель включає матрицю властивостей деталі, опис логічних відношень між цими властивостями і граф взаємозв'язків операторів за можливістю послідовності їх використання.

Розробка математичних моделей здійснюється на різних ієрархічних рівнях: мікрорівні, макрорівні та метарівні.

Математичні моделі на мікрорівні мають відношення до дослідження напруги стану деталей конструкції і пов'язаних з ним розрахунків на міцність. Напружений стан деталей конструкції залежно від геометрії досліджуваного вузла, виду прикладеного навантаження і властивостей матеріалу описується диференціальними рівняннями різного вигляду. Точне рішення таких краєвих задач отримують тільки в окремих випадках. Тому реалізація таких ММ на мікрорівні полягає у використанні різних наближених моделей. В даний час найбільш широкого поширення набули моделі на основі інтегральних рівнянь і на основі методу сіток. Одним з найбільш популярних методів рішення краєвих задач в САПР є метод кінцевих елементів.

Математичні моделі на макрорівні. Більшість технічних підсистем характеризують фазовими змінними. Фазові змінні утворюють вектор невідомих в ММ технічної системи. Для кожної фізичної підсистеми характерні свої закони, проте для простих елементів їх рівняння однакові.

Математичні моделі на метарівні. Такі математичні моделі в технологічних системах представляють собою велику різноманітність.

Це математичні моделі на основі цілочисельного програмування, що розв'язують задачі моделювання та оптимізації роботи різноманітних виробничих та технологічних структур. Для цього використовують метод гілок і границь.

Математичні моделі з використанням систем масового обслуговування. Ці системи основані на марківському випадковому процесі. Фізична система з часом змінює свій стан (переходить з одного стану в інший) випадковим чином. При цьому в системі протікає випадковий процес, званий марківським, якщо для будь-якого моменту часу імовірнісні характеристики процесу в майбутньому залежать тільки від його стану в даний момент часу і не залежать від того, коли і як система прийшла в цей стан. Імовірнісні характеристики в майбутньому можна знайти. Наприклад, вірогідність того, що через деякий час система опиниться в новому стані або збереже попередній стан і т.п. Таким чином, в марківському випадковому процесі майбутнє залежить від минулого тільки через сьогодення.

Розглядаючи марківські процеси з дискретними станами і безперервним часом, зручно уявляти, що всі переходи системи із стану в стан відбуваються під дією якихось потоків подій (потік викликів, потік відмов, потік відновлень і т. д.). Якщо всі потоки подій, що переводять систему із стану в стан, – прості, то процес, що протікає в системі, буде марківським. Це і природно, оскільки простий потік не має наслідку: в ньому майбутнє не залежить від минулого. Маючи в своєму розпорядженні розмічений граф станів системи, легко побудувати ММ даного процесу. Процес роботи такої системи масового обслуговування (СМО) є випадковим процесом з дискретними станами і

безперервним часом, її стан змінюється стрибком в моменти появи якихось подій (або приходу нової заявки, або закінчення обслуговування, або моменту, коли заявка, якій набридло чекати, покидає чергу).

Методи теорії масового обслуговування дозволяють побудувати ММ, що пов'язує задані умови роботи СМО (кількість каналів, їх продуктивність, правила роботи, характер потоку заявок) з характеристиками - показниками ефективності СМО, описують, з тієї або іншої точки зору, її здатність справлятися з потоком заявок. Такими показниками (залежно від обстановки і цілей дослідження) можуть бути різні величини, наприклад: середня кількість заявок, що обслуговуються СМО в одиницю часу; середня кількість зайнятих каналів; середня кількість заявок в черзі і середній час очікування обслуговування; вірогідність того, що кількість заявок в черзі перевищить якесь значення тощо. Серед заданих умов роботи СМО можуть також бути кількість каналів, їх продуктивність, режим роботи СМО тощо.

Наведені вище положення використовують, наприклад, при виборі компоновки робототехнічного комплексу при обслуговуванні групи верстатів декількома роботами. Це дає також можливість виконувати функції транспортування. При багатоверстатному обслуговуванні мають місце втрати часу або очікування верстатом обслуговування, якщо одночасно на декількох позиціях виникає потреба в нових заготовках.

Імітаційні математичні моделі. Прикладом використання імітаційної ММ є моделювання процесу виготовлення деталей на гнучкому виробничому модулі (ГВМ) на етапі вибору оптимального варіанту структури операції і його аналізу. Верстатний модуль з ЧПК містить одну, дві або більше робочих позицій. Обробка може проводитися одночасно на всіх позиціях за керуючими програмами. Процес обробки деталей розглядається як процес функціонування складної виробничої системи.

Реальні складні системи функціонують в умовах дії великої кількості випадкових збуджуючих факторів, що приводять до порушення нормального ходу роботи. Джерелами збуджуючих факторів є дії зовнішнього середовища і

різні відхилення, системи, що виникають всередині. Під дією випадкових факторів продуктивність, час виконання планового завдання і інші техніко-економічні показники не тільки піддаються розсіянню, але і зміщуються від своїх середніх значень. Тому їх оцінка тільки за середніми значеннями є наближеною.

При моделюванні на ОТ процесу виготовлення партії деталей має місце відтворення явищ, що відбуваються, із збереженням їх логічної структури і розташування в часі. Це дозволяє отримувати найбільш точні характеристики процесу виготовлення (продуктивність, час обробки деталей тощо).

Метою моделювання процесу виготовлення деталей на ГВМ є проектний розрахунок технічної продуктивності і інших показників економічної ефективності з урахуванням заданого варіанту структури операції, надійності устаткування і інструменту, різних подій, що виникають в процесі обробки.

Результати моделювання використовують для підвищення якості значень, що приймаються на етапі проектування операцій і підготовки керуючих програм для ГВМ, вони також дозволяють досліджувати ступінь впливу надійності окремих інструментів, кількості і виду інструментів-дублерів, розміру партії деталей на показники роботи багатопозиційного ГВМ. Таким чином, моделювання процесу виготовлення деталей виконується для вирішення наступних завдань:

а) прогнозування основних характеристик роботи багатопозиційного ГВМ при заданому варіанті структури операції часу виготовлення партії деталей, технічній продуктивності, тривалості простоїв через відмови інструментів і устаткування, середньої кількості відмов тощо;

б) отримання закону розподілу часу виконання планового завдання, статистичних характеристик та інших показників економічної ефективності;

в) використання результатів моделювання для вибору оптимального варіанту структури операції;

г) дослідження варіантів структури операції обробки деталі за допомогою розробленої імітаційної моделі.

Математична модель процесу виготовлення деталей на багатопозиційних ГВМ будується з урахуванням заданого варіанту структури операції, заданої компоновки устаткування, надійності елементів і їх взаємозв'язку в процесі обробки.

При побудові моделі приймають до уваги такі особливості багатопозиційного ГВМ:

а) наявність декількох позицій обробки, причому обробка ведеться одночасно на всіх позиціях за керуючими програмами;

б) у будь-який момент часу на кожній позиції обробка ведеться тільки одним інструментом;

в) наявність на кожній позиції магазина із змінними інструментами.

В основу моделювання процесу обробки покладена структура операції, що визначає, які переходи на якій позиції і в якій послідовності виконуються, які інструменти - дублери використовуються тощо.

Процес виготовлення деталей є дискретним стохастичним процесом. Його дискретність полягає в тому, що елементарні акти (переходи, заходи відновлення працездатності тощо) виконуються не миттєво, а мають певну тривалість, причому наступний акт виконується тільки після повного закінчення попереднього.

В процесі обробки задіюють велику кількість елементів (інструменти, устаткування тощо), які у випадкові моменти часу можуть виходити з ладу, вимагають заміни або ремонту. Це призводить до порушення нормального ходу обробки. Параметри, що оцінюють появу відмов і витрати часу на виконання відновлювальних робіт, носять випадковий характер. Випадковими величинами є загальний час роботи устаткування, загальний час роботи кожного інструменту, час безперебійної роботи ГВМ між послідовними відмовами, час відновлення працездатності, сумарний час виготовлення партії деталей, технічна продуктивність тощо.

Імітаційну модель також перевіряють на чутливість. Ця перевірка полягає у визначенні значущості впливу можливих відхилень в межах заданої точності

(допуску) постійних параметрів, що входять в модель, на результат моделювання. За допомогою імітаційної моделі можна, наприклад, визначити час виготовлення партії деталей, власні втрати часу через відмови інструментів і технічну продуктивність.

Таким чином, імітаційна модель і моделювання процесу виготовлення деталей дозволяють відтворювати послідовну або паралельно-послідовну схему обробки, враховувати стохастичні події і їх вплив на процес обробки. Це дає можливість детально аналізувати спроектовані варіанти структури-операції, досліджувати вплив зміни різних параметрів на технічну продуктивність, коефіцієнт технічного використання та інші показники.

Ефективним інструментом моделювання дискретних процесів, зокрема функціонування виробничих систем, є використання мереж Петрі. Їх особливість полягає в можливості відображення паралелізму, асинхронності та ієрархічності роботи складних систем.

Моделювання роботи складних систем та оптимізація їх параметрів може здійснюватись також засобами структурно-логічного методу.

Для структурного моделювання та оптимізації в роботах Згуровського М.З., Зайченка Ю.П., Перренка А.І., Вітлінського В.В., Дубового В.М., Квєтного Р.Н., Глушик М.М., Кучми М.І., Лаврова Є. А., Нефьодова Ю.М. Душинского В.В.та інших вчених використано методи математичного програмування й теорії графів [5, 9, 11, 13, 16, 21, 22, 37].

Різновиди методів моделювання складних систем, до яких належать і технологічні системи, наведено на рис. 1.1.

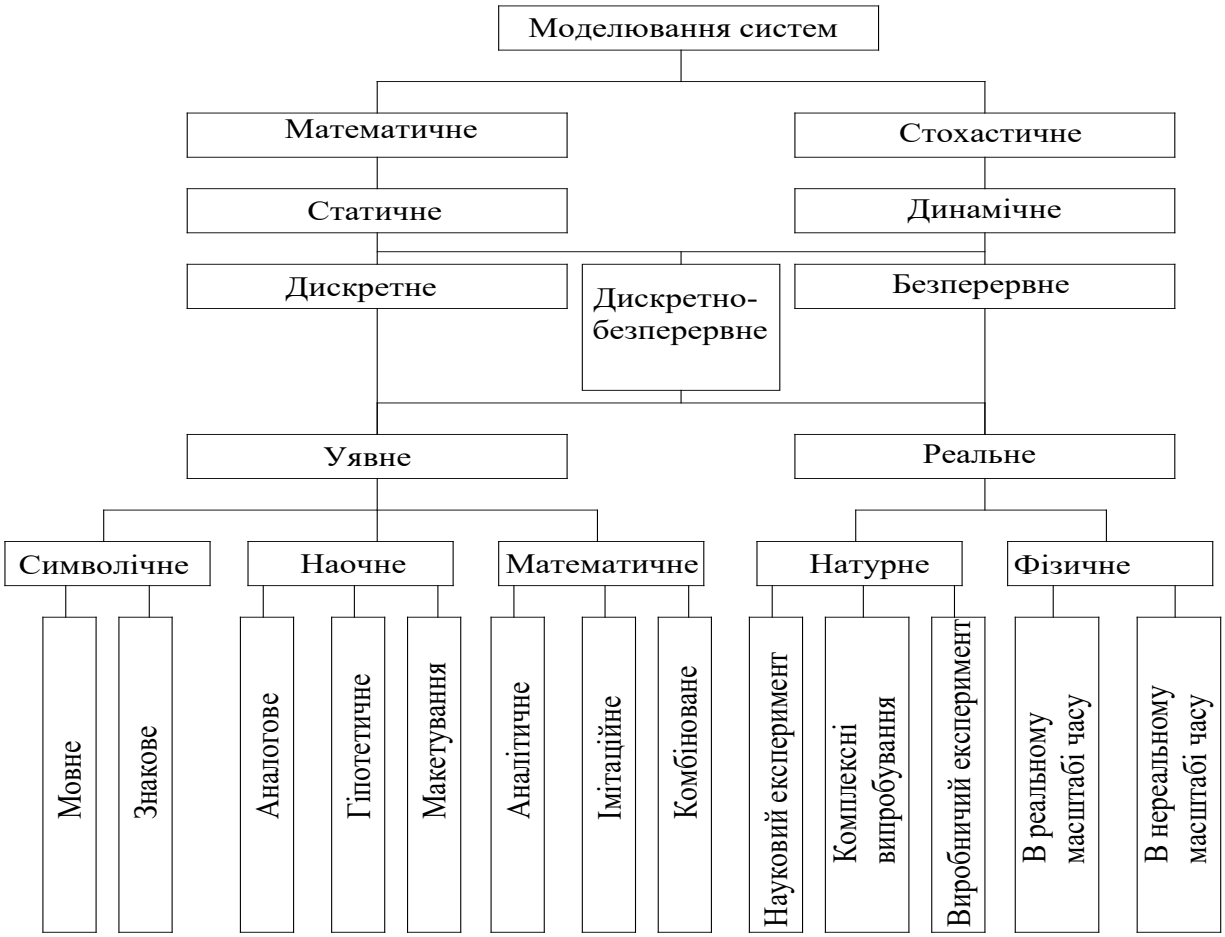


Рис. 1.1. Класифікація видів моделювання складних систем.

Методи математичного моделювання для розв’язання задач математичного моделювання з подальшою параметричною оптимізацією застосовуються в роботах Остаф’єваВ.О., ГавришаА.П,. Дубового В.М, Квєтного Р. Н., Радченко С. Г. Равської Н. С., Душинського В. В., Петракова А. В.тощо.

В роботах Д. В. Чарнко, В. О. Остаф’єва, А. П. Гавриша, Радченко С. Г. для моделювання технологічних параметрів використовуються методи терії предикатів, алгебри логіки та теорії множин [8, 13, 15, 22, 24, 32, 41, 57].

На рис. 1.2 наведено класифікацію методів математичного моделювання, які можна застосовувати при отриманні математичних моделей різноманітних технологічних параметрів. Вибір того або іншого методу визначається постановкою задачі математичного моделювання та вимогами до точності опису досліджуваного параметра отриманою моделлю.

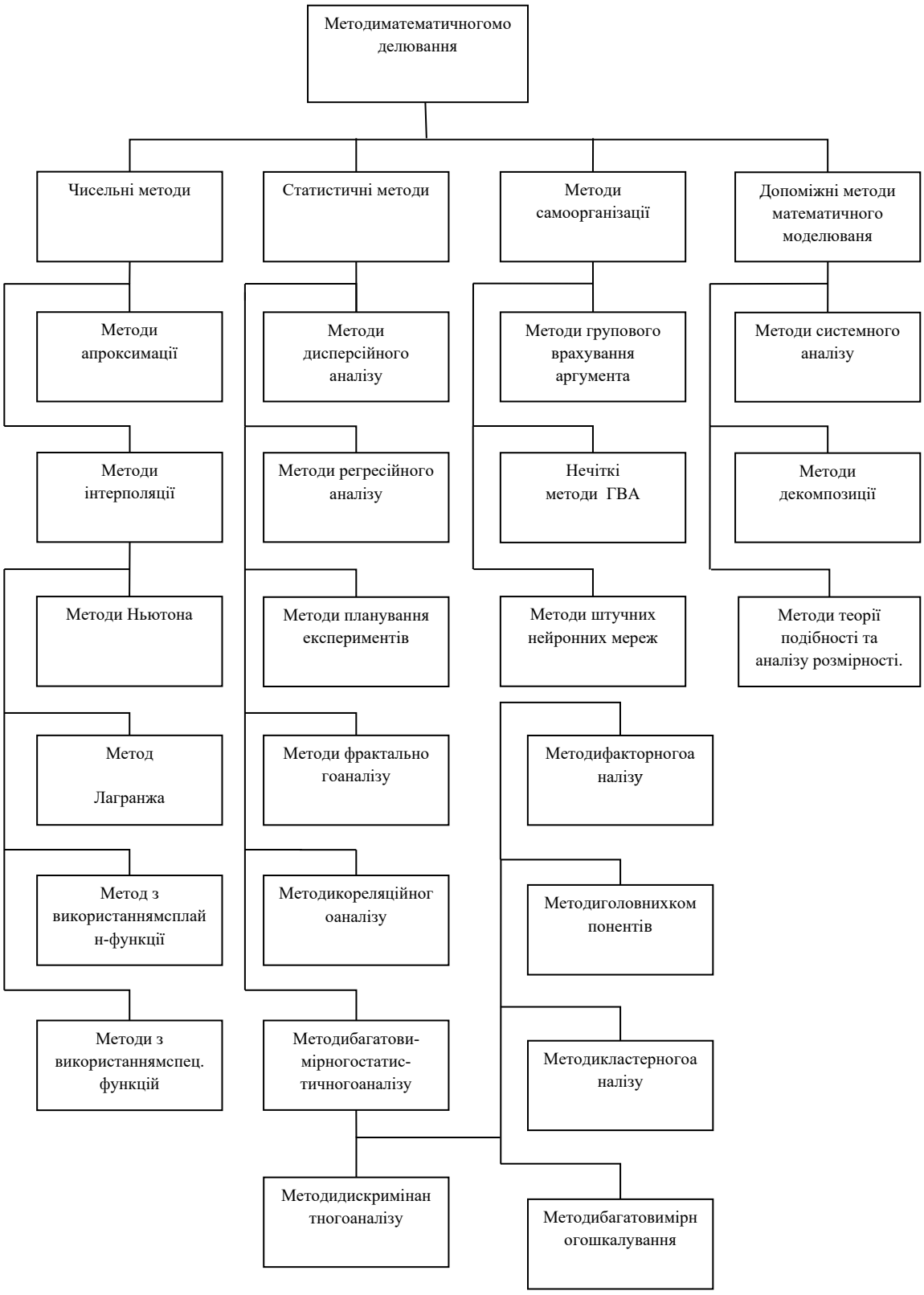


Рис. 1.3. Класифікація методів параметричного моделювання.

1.5. Математичне моделювання технології складання виробів

Виконати опис послідовності дій, що пов’язані з утворенням виробу в процесі складання, через систему формул, які розкривають формальні залежності елементів технологічного процесу, означає створити основу для побудови формальних процедур проектування технології. Ці процедури, у свою чергу, можуть бути використані як методика проектування технологічного процесу складання і як основа для розробки системи автоматизованого проектування технологічних процесів [8, 11, 34].

Функції, що характеризують функціональні зв’язки між елементами виробу, де вони задані у вигляді матриць, що встановлюють відповідність між властивостями елементів виробу і елементами виробничої системи.

Зазвичай склад складальної одиниці визначається як підмножина з'єднань, що містить такі елементи, які в технологічному процесі складання можуть бути виділені в окрему складальну одиницю. Після встановлення множини складальних одиниць, порядок їх виконання описується підмножиною декартового добутку, в якому відношення порядку відповідає можливій послідовності між складальними одиницями в процесі складання виробу. Вид операції визначається множиною параметрів (властивостей) виконуваного з'єднання і вибраним способом забезпечення точності. Таким чином, з множини відомих видів операції вибирається така підмножина видів операцій, кожна з яких відповідає необхідним параметрам конкретного виробу. Аналогічно виділяється підмножина переходів в операцію з множини відомих переходів, де підмножина переходів визначається видом операції і значеннями параметрів з'єднань. Порядок операцій за видами і порядок переходів в операції описується підмножинами декартового добутку, де відношення порядку відповідає послідовності виконання різних видів операцій і переходів в технологічному процесі складання.

Формалізація опису об’єктів складання та отримання математичних залежностей, що характеризують послідовність технологічного процесу складання виробів має важливе значення в розвитку наукових основ технології

приладо- та машинобудування. Праці Мельничука П. П., Петраков Ю. П., Савуляка В. В., Севостьянова І. В. та інших вчених дозволили практично реалізувати метод автоматизації проектування технологічних процесів механоскладальних робіт.

У роботах Н.Г. Брусвича, А.П. Гавриша, Згуровського М.З., та інших вчених досліджуються різні методи розв'язання конструкторських та технологічних задач, які відносяться до вибору параметрів процесу складання, його оснащення та функціонування у часі. Подальший розвиток теоретичних та практичних основ математичного моделювання та формалізації виробів і технологічних процесів складання виробів знайшли своє відображення в роботах А.С. Зенкіна, А. Гонсалеса-Саббатера, В.М. Давигори, С.В. Лапковського, В. Шабайковича, В.А. Пасічника, В.М. Корінькова тощо. Але в більшості робіт не в повній мірі вирішені питання створення інформаційної моделі складальної одиниці та виробу в цілому, а також інформаційної моделі технологічного процесу, що дозволили б більш просто та ефективно підійти до розв'язання задач автоматизації проектування технології механоскладальних робіт на основі використання віртуальних процесів та з врахуванням CALS - технологій.

Треба відзначити, що раніш виконані роботи враховують особливості складання виробів машинобудування. Але характер приладобудівного виробництва та особливі вимоги до виготовлення приладів вимагають використання інших підходів до формалізації та моделювання конструкції складальних одиниць та приладів, а також технології їх складання.

В результаті проведеного аналізу з'ясовано, що основними задачами моделювання технологічних процесів складання приладів є формалізований синтез технічно виконуваних послідовностей складання та вибір найбільш прийнятних їх варіантів, які відповідають заданим технічним вимогам. Встановлено, що синтез технологічних процесів складання приладів потребує удосконалення в частині формалізації процесу побудови моделі об'єкту складання, представленні у суворій математичній формі загальних

закономірностей технології, що представлені на сьогодні в слабоформалізованих знаннях, та створенні на їх основі моделі послідовності складання приладів. Крім того, недостатньо приділена увага інформаційному наповненню математичних моделей та удосконалення методів ідентифікації структури об'єкта та процесу складання, необхідних для автоматизованого проектування технологічних процесів складання.

Питання для самоконтролю

1. Що таке математична модель і які її основні функції?
2. Які основні вимоги пред'являються до математичних моделей?
3. Чому вимоги точності, економічності та універсальності є суперечливими?
4. Що характеризує ступінь універсальності математичних моделей?
5. Як оцінюється точність математичної моделі?
6. Що означає економічність математичної моделі?
7. За якими ознаками класифікують математичні моделі?
8. У чому різниця між структурними та функціональними моделями?
9. Які види структурних моделей існують?
10. Що описують функціональні моделі?
11. Чим відрізняються аналітичні, алгоритмічні та імітаційні моделі?
12. Які особливості моделей на макрорівні?
13. Що описують моделі метарівня?
14. Чим відрізняються безперервні та дискретні моделі?
15. Що таке повна математична модель?
16. Що таке макромодель?
17. У чому особливість динамічних моделей?
18. У чому особливість статичних моделей?
19. Що таке імітаційна модель?
20. Де застосовуються імітаційні моделі?
21. Які основні етапи побудови математичної моделі?

22. Які джерела початкової інформації для моделювання?

23. Що таке синтез структури моделі?

24.Як визначають параметри моделі?

25.Як оцінюється адекватність моделі?

26. Які методи спрощення моделей існують?

27. Що таке таблична модель?

28. Що таке мережева модель?

29. Що таке перестановочна модель?

30. Як використовується граф у моделюванні?

31. У чому суть імітаційного моделювання?

32. Які фактори впливають на виробничі процеси?

33. Чому процеси є стохастичними?

34. Які випадкові величини враховуються?

35.Що таке чутливість моделі?

36.Які задачі вирішує моделювання виробничих процесів?

37.Як впливають відмови на виробничий процес?

38. Які показники оцінюють ефективність виробничого процесу?

39.Які методи використовують для моделювання складних систем?

40. Що таке мережі Петрі?

41. Від чого залежить вибір методу моделювання?

42. Яку роль відіграє математичне моделювання в технологічному проектуванні?

РОЗДІЛ 2.
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ РОЗВЯЗАННІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ

2.1. Підвищення інформативності початкової інформації при розв’язанні технологічних задач

Для сучасної технології приладо- та машинобудування характерне використання величезних інформаційних масивів і значної кількості складових елементів (параметрів). Тому при дослідженні таких багатопараметричних систем виникає необхідність виключити деякі з параметрів, а також деякі функції з математичної моделі, зберігши при цьому всю їх інформативність. Одним з найпоширеніших видів представлення даних про систему є багатовимірна матриця, рядки якої відповідають окремим об'єктам системи (для технологічної системи це виріб, деталь, технологічний маршрут, режими обробки і ін.), що описується набором конкретних значень параметрів, а стовпці – різні набори конкретних значень параметрів цих об'єктів. На практиці розміри розглянутих матриць можуть бути досить великими. Безпосередній, візуальний аналіз таких матриць практично неможливий та й практичне їх використання в розрахунках викликає значні труднощі. Тому в математичній статистиці виникло багато підходів і методів, призначених для того, щоб стиснути вихідну інформацію до доступних для огляду розмірів, витягти з неї найбільш істотну, відкинути всю другорядну, не значиму та випадкову.

В розділі представлено особливості використання методів багатовимірного статистичного аналізу для підвищення інформативності початкової інформації шляхом зниження розмірності факторного простору при розв’язанні задач технологічної підготовки виробництва. Наведено опис методів факторного, компонентного аналізу та багатовимірного шкалування, дано алгоритми цих методів, програмну їх реалізацію та приклади використання вказаних методів для зниження розмірності інформаційних масивів, використовуваних при технологічній підготовці

виробництва [4, 8, 16,24, 33].

2.1.1. Зниження розмірності інформаційних масивів методами факторного аналізу

В багатьох дослідницьких роботах початкова кількість ознак, що характеризують досліджувані об'єкти досить велика, проте ці ознаки варто обробити й осмислити. Тому дослідник, заздалегідь не уявляючи собі, які ознаки будуть найбільш корисні для моделювання, в якості опису об'єкта бере участь весь набір характеристик об'єкта, наявний у його розпорядженні. Іноді висловлюється думка, що варто складати „повний опис" об'єкта, який був би придатним для будь-якого його моделювання. Але такий „повний опис" одержати неможливо, тому що кількість властивостей будь-якого реального об'єкта нескінченна, а вибір кінцевої, але надлишкової кількості ознак приводить до необґрунтованих витрат. По-перше, збільшення кількості ознак призведе до більших витрат машинного часу і, як наслідок, до подорожчання досліджень. Наприклад, час визначення відстані між об'єктами по Евкліду залежить лінійно від розмірності факторного простору, а час обчислення відстані Махаланобіса – експоненціально. По-друге, ступінь представлення вибірки ознак одного і того ж обсягу обернено пропорційна розмірності простору ознак. У випадках малих обсягів навчальних вибірок добавка неінформативних ознак може погіршити якість обробки даних. По-третє, при великій розмірності простору опису втрачається наочність подання даних, яка особливо важлива при використанні діалогових систем обробки інформації. Утруднюється також інтерпретація отриманих результатів.

Стиснення масивів початкової інформації методами факторного аналізу шляхом зменшення початкової кількості властивостей досліджуваного об'єкту від n до l факторів, де l<*n* дозволяє розв'язати три основні задачі:

1) підвищення ефективності дослідження за рахунок більш раціонального використання можливостей машинної обробки;

2) підвищення статистичної вірогідності інформаційної вибірки даних, що представлена для моделювання;.

3) забезпечення більшої наочності й простоти інтерпретації результатів. Тут особливо важливі випадки, коли розмір нового факторного простору l< 3, тобто можливий безпосередній візуальний аналіз простору опису .

Задача факторного аналізу полягає в тому, щоб виразити параметр y_j, де y_j нормоване значення j-ї властивості об'єкта x_{ij}, у вигляді схованих гіпотетичних факторів. Найпростішою моделлю для опису одного параметра може служити лінійна модель. Пірсон запропонував евристичний метод стискування великого масиву інформації з одночасним виділенням максимальної дисперсії. Потім, Хотелінг розвинув цей метод, створивши метод головних компонентів. Модель аналізу методом головних компонент даних має вигляд:

$$y_j = a_{j1}f_1 + a_{j2}f_2 + ... + a_{jn}f_n \text{ , } j = 1, 2, ..., n; \qquad (2.1)$$

де кожний з параметрів лінійно залежить від n некорельованих між собою компонентів (факторів) $f_1, f_2, ..., f_n$.

Найважливішою властивістю методу є те, що кожен наступний компонент вносить максимально можливий внесок у сумарну дисперсію параметрів.

При визначенні кількості факторів (латентних змінних) часто застосовують правило, яке дозволяє залишати фактори з власними числами, що мають значення більше одиниці. При цьому використовується кореляційна (нередукована) матриця факторів. Цей простий спосіб визначення кількості латентних змінних добре зарекомендував себе, тому що зазвичай дає результати, які співпадають з тими, що очікує дослідник. Крім того, даний метод був ретельно перевірений на модельних штучних даних.

Використовують також критерії вибору кількості факторів, що основані на величині долі відтворюваної дисперсії. Критерії значимості „оперують" з вибірковою змінністю даних. Критерії, що основані на власних числах, формуються в термінах абстрактних характеристик матриці. Можливий і третій

підхід – для кожного фактора оцінюється доля дисперсії, відтворювана цим фактором.

Факторний аналіз дозволяє одержати не тільки відображення, але і значення коефіцієнтів кореляції між параметрами і факторами. Таблицю таких коефіцієнтів кореляції називають факторною структурою або просто структурою. Для виконання повного факторного аналізу даних необхідне як відображення, так і структура.

На основі методики розроблено алгоритм факторного аналізу, який програмно реалізований й апробований при обробці різноманітної технологічної інформації.

Наведемо приклад, що реалізує підвищення інформативності початкової інформації при дослідженні технологічного процесу токарної обробки титанового сплаву ВТ3-1 твердосплавними пластинками з вольфрамових сплавів ВК3, ВК4, ВК6, та ВК8. Метою досліджень є визначення періоду стійкості різців від режимів різання та матеріалу інструменту. При цьому обробку виконували пластинками з параметрами різальної крайки φ=45°, φ_1=10°, λ=0°, α=8°, γ=15°, r=1 мм та режимами різання V= 16...45 м/хв., s=0,2 мм/об, t=1...4,5 мм. В якості критерію зношення інструменту вибрано знос по задній грані 0,9 – 1 мм. З метою підвищення точності результатів досліджень доцільно враховувати хімічний склад та фізико-механічні властивості оброблюваних матеріалів. Але це призводило до збільшення кількості початкових параметрів і, в результаті, до значного підвищення вартості досліджень, витрат інструментальних і оброблюваних матеріалів та часу проведення цих експериментів. Тому для зменшення кількості початкових параметрів без втрати їх інформативності характеристики інструментальних матеріалів (вміст кобальту та вольфраму в матеріалі інструменту й фізико-механічні властивості) стиснено методами факторного аналізу. Критерієм вибору кількості латентних змінних (факторів), які в достатній мірі характеризують початкову інформацію, вибрано величину власних значень λ кореляційної матриці параметрів вказаних матеріалів. Залишено тільки ті

фактори, власні значення яких перевищували 1. Ці фактори, після ранжирування власних значень λ, відповідні дисперсії й сумарні значення дисперсії отриманих факторів (значення параметрів інформативності) наведено в таблиці 2.1. Таким чином, отримано два латентні фактори f_1 і f_2 , що на 85,98% характеризують інформативність початкових даних.

Таблиця 2.1. **Власні значення та відповідні їм дисперсії, що визначають інформативність факторів вольфрамових твердих сплавів**

№ фактору	Початкові власні значення та відповідні їм дисперсії			Дисперсії значимих компонент	
	Всього	% дисперсії	%накопичення	% дисперсії	%накопичення
1	3,677	73,534	73,534	73,534	73,534
2	1,057	21,141	94,675	13,700	85,980
3	0,250	5,000	99,675		
4	0,16	0,325	99,999		
5	3,358E-17	6,715E-16	100,000		

Обробка результатів експериментальних досліджень з метою отримання залежності

$$T=F(V, t, \textit{інстр. матеріал}) = F(V, t, f_1, f_2)$$

наведена в розділі 4.

Використання визначених факторів дозволило зменшити кількість експериментів по меншій мірі з 128 до 16 (при використанні повного факторного експерименту). Крім того, отримано залежності, що дозволяють визначити значення факторів для будь-якого іншого інструментального матеріалу вольфрамової групи за його властивостями та факторними навантаженнями. Ці залежності мають такий вигляд:

$$x_{li} = a_{i1} f_{1l} + a_{i2} f_{l2};$$

де x_{li} –нормоване значення i–ї властивості (параметру) l–го інструментального матеріалу, i=1,...,5, l=1,...,22;

f_{lk}– значення k – ї латентної змінної l – го конструкційного матеріалу, k=1,2;

a_{ik}– значення k – го факторного навантаження i–ї властивості.

З метою дослідження вихідних параметрів процесу різання (складових сили різання та шорсткості обробленої поверхні) вуглецевих якісних конструкційних сталей з врахуванням їх хімічного складу та фізико-механічних властивостей виконано зниження розмірності простору початкових даних. Використання факторного аналізу дозволило представити властивості 30 найменувань конструкційних матеріалів – кількість вуглецю *C*, марганцю *Mn*, кремнію *S*i, хрому *Cr* та його фізико-механічні властивості R_{eH}, R_m, *A*, *Z*, *HB* двома латентними факторами f_1 і f_2.. Значення факторних навантажень, що дозволяють вирахувати відповідні величини латентних факторів для кожного матеріалу, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. **Значення факторних навантажень факторів для вуглецевих якісних конструкційних сталей**

№ п/п	Вихідний параметр x_i	Факторні навантаження	
		a_{i1}	a_{i2}
1	*C*	0,993	-0,082
2	*Mn*	0,627	0,486
3	*Si*	0,669	0,357
4	*Cr*	0,612	0,320
5	R_{eH}	0,830	-0,339
6	R_m	0,944	-0,311
7	*A*	-0,989	-0,006
8	*Z*	-0,965	0,058
9	*HB*	0,982	-0,034

Також, як приклад, що показує ефективність факторного аналізу для зниження розмірності початкового масиву інформації, розглянуто фізико-механічні властивості та хімічний склад низьколегованих конструкційних сталей, що включає загалом 20 різноманітних найменувань. Початковий набір інформації складається з таких компонентів хімічного складу сталей як вуглець *C*, кремній *Si*, марганець *Mn*, фосфор *P*, хром *Cr*, нікель *Ni*, мідь *Cu*, ванадій *V*, ніобій *Nb*, азот *N* та алюміній *Al*. Фізико - механічні властивості сталей

представлено границею міцності під час розтягування R_m, границею плинності R_{eH}, відносним видовженням під час розірвання A.

Встановлено, що більше 80% узагальненої дисперсії припадає на перші чотири фактори. Таким чином, за допомогою цих латентних змінних можна представити всі початкові параметри низьколегованих конструкційних сталей, використовуючи залежність:

$$x_{li} = a_{i1}f_{1l} + a_{i2}f_{l2} + a_{i3}f_{3l} + a_{i4}f_{l4}; l = 1, ..., 20; i = 1, 2, ..., 14;$$

де a_{ij}– j- те факторне навантаження i–ї властивості матеріалу.

Значення факторних навантажень для кожної властивості досліджуваного матеріалу наведено в таблиці 2.3.

*Таблиця 2.3.***Значення факторних навантажень факторів для низьколегованих конструкційних сталей**

№ п/п	Хім. скл., фіз.мех.вл.	Факторні навантаження			
		a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i1}
1	*C*	0,685	0,141	0,047	0,725
2	*Mn*	0,646	-0,564	0,044	-0,346
3	*Si*	-0,479	0,021	0,893	-0,012
4	*P*	-0,351	0,360	-0,327	-0,007
5	*Cr*	-0,549	0,667	-0,023	0,141
6	*Ni*	-0,611	0,760	0,037	-0,019
7	*Cu*	-0,499	0,780	-0,024	-0,122
8	*V*	0,845	0,372	-0,016	-0,016
9	*Nb*	0,010	-0,110	-0,174	-0,294
10	*N*	0,744	0,350	0,032	-0,037
11	*Al*	-0,147	-0,224	0,622	-0,086
12	R_{eH}	0,696	0,627	0,208	-0,156
13	R_m	0,729	0,544	0,306	-0,031
14	*A*	-0,325	-0,565	0,104	0,350

На рис. 2.1 наведено графік залежності власних чисел λ кореляційної матриці від номера отриманого фактора (латентної змінної).

За результатами використання методів факторного аналізу при технологічних дослідженнях та математичному моделюванні можна зробити наступні висновки:

1) методам факторного аналізу інформації характерні математична суворість і закінченість методики;

2) факторний аналіз варто використовувати при наявності значних обсягів інформації про об'єкт дослідження і моделювання;

3) методи факторного аналізу дозволяють ефективно стиснути масиви вихідних даних;

4) за допомогою методів факторного аналізу можна оцінити характер взаємозв'язків між параметрами й одержати попередню математичну модель досліджуваного об'єкта;

5) основні труднощі при практичному застосуванні методів факторного аналізу полягають в значному обсязі необхідних обчислювальних робіт, які однак досить успішно реалізуються на сучасних комп'ютерів.

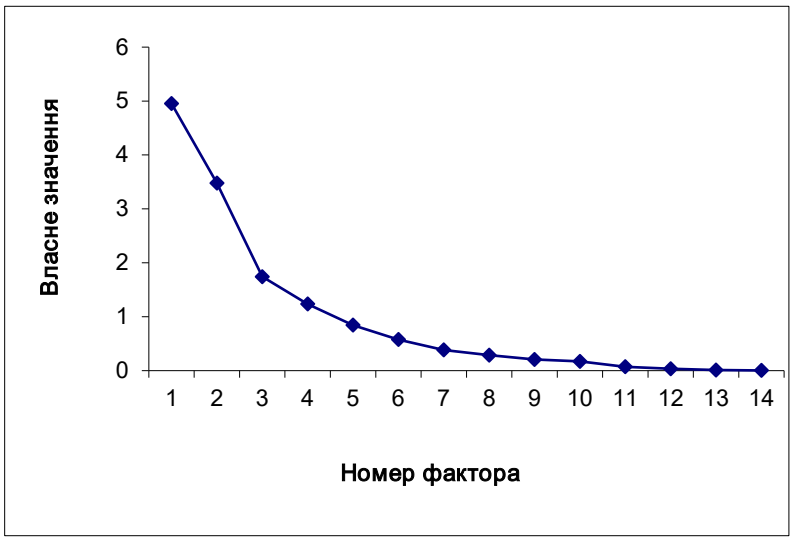


Рис.2.1. Графік залежності власного значення λ кореляційної матриці параметрів низьколегованих конструкційних сталей від номера фактора (латентної змінної).

2.1.2. Зниження розмірності інформаційних масивів методом компонентного аналізу

Тривалий час метод головних компонентів (компонентний аналіз) розглядався багатьма авторами як один з різновидів методів факторного аналізу. При цьому під факторним аналізом розуміли спосіб приведення множини ознак, що безпосередньо спостерігаються, до меншого числа неявних, але об'єктивно існуючих факторів. В даний час метод головних компонентів

часто відокремлюють від факторного аналізу. Вперше він був запропонований К. Пірсоном, потім розвинутий, доопрацьований, описаний і обґрунтований у роботах Г. Хотеллінга, Г. Хармана, С. Рао, П. Андруковича, С.А. Айвазяна тощо.

У нашій країні метод головних компонентів став поширюватися з появою комп'ютера внаслідок зручності математичних процедур, які дали можливість застосувати їх для організації математичного забезпечення алгоритму розрахунку.

Метод головних компонентів має значні переваги перед методами факторного аналізу. Він не вимагає, наприклад, ніяких гіпотез про змінні, є лінійним і адитивним.

У книзі Д. Лоулі й А. Максвелла сказано, що факторний аналіз вивчає коваріації, а метод головних компонентів – дисперсії. Однак Рао показав, що метод головних компонентів однаково добре наближає дисперсії і коваріації.

В залежності від розв'язуваних задач кожний з методів факторного аналізу, як і метод головних компонентів, має свої переваги і недоліки. Незважаючи на те, що метод головних компонентів є статистичним, існує підхід, що не є статистичним. Цей підхід пов'язаний з одержанням найкращої проекції сукупності точок спостереження в простір меншої розмірності. У цьому випадку треба знати матрицю інших моментів. При статистичному підході, який тут буде розглядатись, задача полягає у виділенні лінійних комбінацій випадкових величин, що мають максимально можливу дисперсію. Загальним між статистичним і нестатистичним підходами є використання матриці інших моментів, як вихідної для початку аналізу.

Відомо, що дійсна величина досліджуваного явища містить, принаймні, дві компоненти: дійсну характеристику оцінюваного явища; похибку виміру, що залежить від більшого числа причин. Якщо виміри проводяться в психології, біології, економіці та техніці, то додається третя складова, залежна від варіабельності досліджуваної ознаки, індивіда або об'єкта. Таким чином, зареєстроване значення може бути представлене у вигляді суми

$$x_{ji} = x_{mi} + x_{si} + x_{bi},$$

де x_{ji}– зареєстроване значення вимірюваної ознаки (параметра) в i–го об'єкта дослідження;

x_{mi} – дійсне значення (математичне чекання) вимірюваної ознаки в i–го об'єкта;

x_{si} – варіативне значення вимірюваної ознаки в i–го об'єкта;

x_{bi} – похибка виміру при визначенні j–ї ознаки i–го об'єкта дослідження.

Тому, що похибка виміру значно менше варіативної частини ознаки, то її найчастіше поєднують з частиною, яка залежить від індивідуальних, специфічних особливостей. При необхідності її можна виділити.

Незважаючи на те, що в методі головних компонентів треба для точного відтворення коефіцієнтів кореляції між змінними знайти всі n компонент, значна частка мінливості ознак (дисперсії) представляється невеликою кількістю (m) компонентів. Крім того, в методі головних компонентів можна за ознаками описати компоненти, а за компонентами – ознаки.

В основу методу головних компонентів покладено лінійну модель. Якщо m – кількість досліджуваних об'єктів, n – кількість ознак (вимірюваних характеристик об'єкта), то математична модель компонентного аналізу досліджуваного об’єкту приймає такий вигляд:

$$f_j = \sum_{i=1}^{n} a_{il} y_i \qquad (2.2)$$

де i – номер ознаки, i=1,2,…,n;

j – номер компоненти, j=1,2,…,l, $l<n$;

f_j– значення j–ї компоненти;

a_{ij}– вага j–ї компоненти в i–й ознаці;

y_i– нормоване значення i–ї ознаки.

При реалізації методу головних компонент початкові дані можна використовувати як коефіцієнти коваріації, так і коефіцієнти кореляції. В наданих дослідженнях використано коефіцієнти кореляції.

Для встановлення зв'язку між головними компонентами і коефіцієнтами кореляції представимо (2.2) для будь-якого досліджуваного об'єкта *l* як:

$$f_{kj} = \sum_{i=1}^{n} a_{il} y_{ki}, k = 1, ..., m, \quad (2.3)$$

де f_{kj} – значення *j*–ї головної компоненти *k*–го об'єкта;

y_{ki}– нормоване значення *i*–ї ознаки *k*–го об'єкта;

a_{ij}– вага *j*–ї компоненти в *i*–й ознаці;

m – кількість досліджуваних об'єктів.

Варіабельність, що залежить від особливостей об'єктів, є причиною розкиду значень ознак від об'єкта до об'єкта щодо математичного очікування. Повна дисперсія статистичної ознаки виражається через дисперсію головних компонентів.

Незважаючи на те, що замість *n* ознак отримана така ж кількість головних компонентів, внесок більшої частини головних компонентів у дисперсію, що її пояснюють, виявляється невеликим. Виключаються з розгляду ті головні компоненти, внесок яких малий. Встановлено, що за допомогою *m* перших (найбільш вагомих) головних компонентів можна пояснити основну частину сумарної дисперсії.

Наведемо результати роботи програми зниження розмірності методом компонентного аналізу при обробці даних інформаційної моделі процесу різання, що складається з трьох взаємопов’язаних елементів „Вхід”, „Процес” та „Вихід”.

Аналіз параметрів інформаційної моделі процесу різання „Вхід” здійснювали за сукупністю фізико-механічних характеристик матеріалів оброблюваних деталей та їх хімічним складом. Для цього всі параметри, які входять в інформаційну модель, були поділені на дві групи: незалежні

параметри – хімічний склад та стан структури оброблюваного матеріалу; залежні – фізико-механічні властивості. Граничні значення параметрів досліджуваних зразків п’ятнадцяти оброблюваних матеріалів наведено в таблиці 2.5. Використання методу головних компонент для обробки вихідної інформації, що складається з хімічного складу (вуглець, сірка, марганець, кремній, фосфор, хром, нікель, молібден, залізо) та механічних властивостей (твердість, межа міцності під час розтягування, верхня границя плинності, границя плинності під час непропорційного видовження, істинний опір розриву, відносне видовження під час розірвання та відносне звуження під час розірвання) конструкційних матеріалів (легованих сталей), дозволив звузити початковий факторний простір.

В якості критерію визначення кількості головних компонент в практичних задачах можна використовувати значення сумарної дисперсії (наприклад, більше 80%) або ж величину власного значення кореляційної матриці λ_l, яка більше або дорівнює одиниці.

Дисперсії компонент (таблиця 2.4), які визначені для параметрів інформаційної моделі „Вхід”, убувають досить швидко, тому можна зробити висновок, що частину з компонент можна відкинути, залишивши із сімнадцяти тільки чотири, що складають 88,8% сумарної дисперсії, і які в достатній мірі визначають в сукупності всі характеристики оброблюваних матеріалів. Залежність власних чисел від номера головної компоненти наведено на рис.2.2.

Таблиця 2.4. **Значення власних чисел та відповідних їм величин дисперсій параметрів інформаційної моделі „Вхід”**

№ головної компоненти	Значення власного числа λ	Значення часткових дисперсії	Накопичена дисперсія
1	10,193	59,961	59,961
2	2,396	14,096	74,057
3	1,425	8,383	82,440
4	1,077	6,333	88,774

В результаті компонентного аналізу параметрів інформаційної моделі „Вхід” визначено значення вагових коефіцієнтів (навантаження) кожного вихідного параметра на головну компоненту, які наведено в таблиці 2.6. Ці коефіцієнти формують залежності головних компонент від початкових параметрів – хімічного складу та фізико-механічних властивостей легованих сталей, з яких виготовляються деталі

$$f_{kj} = \sum_{i=1}^{17} a_{ij} y_{ki}$$
$$j = 1,\ldots,4\,, \quad k = 1,\ldots,15; \tag{2.4}$$

де y_{ki} – відповідні нормовані значення параметрів хімічного складу та фізико-механічних властивостей деталей;

a_{ij}– значення вагових коефіцієнтів на j-ту головну компоненту i-го початкового (вихідного) параметра досліджуваної інформаційної моделі процесу різання „Вхід” .

Таким чином, зменшення кількості вхідних параметрів матеріалів оброблюваних деталей з сімнадцяти до чотирьох за допомогою компонентного аналізу дозволяє значно знизити кількість експериментів, час на їх проведення і витрати оброблюваного та інструментального матеріалів при збереженні максимальної інформативності початкової інформації.

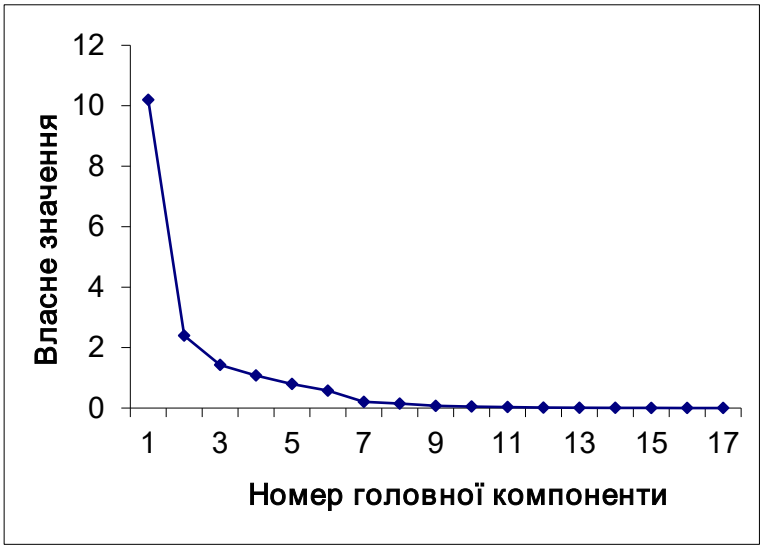


Рис. 2.2. Графік відповідності власного значення номеру головної компоненти параметрів інформаційної моделі „Вхід”.

Таблиця 2.5. **Значення параметрів інформаційного масиву „Вхід”**

№п.п.	Хімічний склад та фізико-механічні властивості матеріалів оброблюваних деталей																
	C	***Si***	***Mn***	***S***	***P***	***Cr***	***Ni***	***Mo***	***Fe***	***Зерн.***	***HB***	R_m	R_{eH}	$R_{p0,2}$	S_k	***A***	***Z***
1	0.55	0.34	0.72	0.03	0.03	0.08	0.15	0.07	98.03	2	207	32	38.9	65.5	71.4	15.2	30.5
2	0.51	0.34	0.73	0.03	0.05	0.07	0.16	0.07	98.04	2	217	30	36.8	68.6	69.3	12.5	19
3	0.24	0.04	0.54	0.02	0.05	0.07	0.16	0.08	98.8	5	143	14	15.9	28.6	36.4	28.1	59.8
4	0.21	0.04	0.54	0.02	0.05	0.05	0.13	0.08	98.91	5	156	15.6	16.6	27.6	35.4	28.1	64
5	0.21	0.03	0.52	0.01	0.05	0.04	0.15	0.09	98.9	5	137	14.9	19.4	29.7	37.8	30.5	60.9
6	0.21	0.03	0.53	0.02	0.05	0.05	0.14	0.15	98.82	5	140	12.7	13.8	26.9	34.1	28.3	64.9
7	0.43	0.29	0.71	0.038	0.07	0.06	0.17	0.7	97.53	3	193	23.51	40.24	53.73	50.36	21.3	31.4
8	0.44	0.26	0.83	0.025	0.06	1.3	0.2	0.12	96.76	4	204	33.2	38.3	65.4	46.7	30.1	34.2
9	0.37	0.32	0.78	0.025	0.06	1.3	0.19	0.11	96.85	4	223	42.54	48.24	78.95	54.82	26.6	26.9
10	0.44	0.29	0.64	0.032	0.05	0.07	0.15	0.9	97.43	3	200	41.63	59.38	84.53	81.06	28.6	18.2
11	0.47	0.29	0.82	0.03	0.1	0.25	0.17	0.7	97.5	3	203	33.51	36.29	63.73	61.36	16.3	40.4
12	0.4	0.29	0.75	0.028	0.012	0.3	0.17	0.11	97.94	2	173	32.46	41.83	64.92	60.24	21.24	34.3
13	0.23	0.28	0.76	0.035	0.07	0.05	0.14	0.13	98.31	3	170	24.85	26.62	43.67	35.15	30.5	58.25
14	0.44	0.3	0.88	0.034	0.11	0.08	0.16	0.12	97.88	4	246	34.24	46.23	71.91	61.64	25.71	30.08
15	0.19	0.3	0.64	0.026	0.011	0.15	0.13	0.1	98.45	4	143	23.84	25.43	44.21	42.81	25.46	55.31

*Таблиця 2.6.***Значення навантажень на головні компоненти інформаційної моделі „Вхід”**

№ п.п.	Вихідний параметр		Навантаження a_{ij} на головні компоненти f_j			
	Наймен уван.	Позна-чення	Компонента 1	Компонента 2	Компонента 3	Компонента 4
1	*C*	y_1	0,139	-0,003	-0,052	0,030
2	*Si*	y_2	0,158	0,011	-0,094	-0,007
3	*Mn*	y_3	0,099	0,069	-0,260	0,292
4	*S*	y_4	0,116	-0,138	0,028	0,255
5	*P*	y_5	-0,099	-0,072	0,009	0,658
6	*Cr*	y_6	-0,123	0,359	-0,132	-0,124
7	*Ni*	y_7	-0,070	0,260	-0,113	0,028
8	*Mo*	y_8	-0,168	-0,117	0,631	0,047
9	*Fe*	y_9	0,076	-0,199	-0,094	0,009
10	*Зерн.*	y_{10}	-0,246	0,091	0,101	0,108
11	*HB*	y_{11}	0,070	0,044	-0,093	0,221
12	R_m	y_{12}	0,000	0,125	0,125	-0,103
13	R_{eH}	y_{13}	-0,024	0,071	0,263	-0,103
14	$R_{p0,2}$	y_{14}	0,028	0,093	0,123	-0,093
15	S_k	y_{15}	0,096	-0,039	-0,201	-0,172
16	*A*	y_{16}	-0,303	-0,143	0,277	-0,014
17	*Z*	y_{17}	-0,066	-0,056	-0,106	0,110

Ефективність застосування компонентного аналізу в технологічних дослідженнях покажемо при визначенні оброблюваності титанових сплавів ВТ3 - 1, ВТ5, ВТ6, ИМП1, ИМП6(1) та ИМП7 при їх точінні різцями з швидкорізальної сталі Р18 з такими параметрами: $\gamma=15^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=15^\circ$, $\lambda=0^\circ$, r=1 мм. Експерименти проводили при швидкості різання V, що варіювалась в межах від 8...40 м/хв., при s=0,2 мм/об та глибині різання t=1 мм. З метою врахування хімічного складу та фізико-механічних характеристик оброблюваних матеріалів, загальна кількість яких складає 17 елементів, в математичній моделі стійкості різального інструменту виконана їх заміна 5 головними компонентами, що з 87,1% враховують інформативність початкових даних. Дана заміна при збереженні інформативності характеристик титанових сплавів дозволить зменшити кількість експериментів, витрати інструментальних та оброблюваних матеріалів, часу проведення та енергетичні витрати й отримати адекватну математичну модель, що з великою точністю представить

досліджуваний процес. В результаті цього для моделювання буде надано залежність

$$T=F(V, f_1, f_2, f_3, f_4, f_5),$$

де T – період стійкості різального інструменту, хв.

В таблиці 2.7 наведено значення вагових коефіцієнтів (навантажень) на головні компоненти, які дозволять визначити головні компоненти f_j, j=1,…,5.

Наведені результати компонентного аналізу для обробки великих масивів інформації, в тому числі і технологічної, дозволяють зробити такі висновки.

1. Ортогональність головних компонент дозволяє будувати за ними рівняння регресії, в яких оцінки коефіцієнтів не залежать одна від одної, що вигідно відрізняє їх від рівнянь регресії, які побудовані за початковими, корельованими між собою незалежними змінними.

2. Методом головних компонентів, окрім зниження розмірності початкового простору параметрів, можна розв’язати ще чотири основних типи задач:

а) знаходження схованих, але об'єктивно існуючих закономірностей, що обумовлені впливом внутрішніх і зовнішніх причин;

б) опис досліджуваного процесу кількістю головних компонентів m, значно меншою, ніж кількість спочатку взятих ознак n. Це обумовлено наявністю великої кількості зв'язків між ознаками;

в) виявлення й вивчення стохастичного зв'язку ознак з головними компонентами. Виявлення ознак, які найбільш тісно пов'язані з даним головним компонентом, дозволяє досліднику виробити й прийняти науково обґрунтований керуючий вплив, що сприяє підвищенню ефективності функціонування досліджуваного процесу;

г) прогнозування ходу розвитку досліджуваного процесу на основі рівняння регресії, що побудоване за отриманими головними компонентами.

3. Негативною стороною методу є складність математичного апарата, що вимагає знання як теорії ймовірностей і математичної статистики, так і лінійної алгебри й математичного забезпечення обчислювальної техніки.

Таблиця 2.7. **Значення навантажень на головні компоненти характеристик титанових сплавів**

№ п/п	Хім.скл., фіз.мех.вл.	Компоненти				
		1	2	3	4	5
1	*Cr*	0.087	-0.165	-0.131	0.321	0.124
2	*Al*	0.016	0.131	-0.291	-0.164	0.045
3	*V*	0.001	0.177	-0.116	-0.284	-0.296
4	*Mo*	-0.006	-0.070	-0.148	-0.112	0.468
5	*Mn*	0.110	-0.083	0.189	-0.220	0.015
6	*Fe*	0.132	-0.088	0.156	-0.061	0.074
7	*Si*	0.037	0.121	-0.028	0.299	0.422
8	*C*	0.016	-0.186	-0.123	0.337	-0.372
9	*H2*	0.096	0.188	0.087	0.185	-0.018
10	*N2*	0.101	0.128	0.216	0.065	0.047
11	*Ni*	0.022	0.248	0.056	0.195	-0.180
12	*Ti*	-0.131	-0.041	0.174	0.205	-0.089
13	*HB*	0.145	0.076	-0.046	0.045	-0.085
14	$R_{p0,2}$	0.095	0.159	-0.170	0.129	0.001
15	R_m	0.150	-0.031	0.099	-0.131	0.066
16	*A*	-0.144	0.106	0.083	0.046	0.051
17	*Z*	-0.136	0.127	0.084	0.031	0.223

2.1.3. Багатовимірне шкалування

Багатовимірне шкалування як метод аналізу даних призначений для обробки емпіричної інформації про складні об'єкти або системи. Ця інформація може носити об'єктивний характер, але може бути також отримана шляхом опитування експертів. Методи багатовимірного шкалування одержали свій розвиток в останні три десятиліття, що пов'язане з інтенсивним удосконалюванням у цей період обчислювальної техніки [8].

За своїм походженням багатовимірне шкалування є одним з напрямків математичної психології. Його прародичами є американські вчені Торгерсон, Шепард, Кумс. Вихідною інформацією служать дані про зв'язки або подібності об'єктів досліджуваної системи. Задача полягає в тім, щоб представити ці об'єкти у вигляді точок деякого координатного простору невеликої розмірності.

При цьому необхідно зберегти структуру системи: зв'язку або подібності об'єктів повинні бути передані відстанями між точками. Така проста геометрична модель приводить до змістовно інтерпретованого рішення: вісі побудованого простору несуть цілком певне значеневе навантаження – вони інтерпретуються як ознаки, що лежать в основі зв'язків між об'єктами. Кожен об'єкт характеризується в тій або іншій мірі цими ознаками, і в такий спосіб маємо можливість отримати висновки про всю систему. Виділені ознаки можуть бути використані в подальшій роботі, їх варто також враховувати при складанні прогнозу.

Хоча при своєму зародженні методи багатовимірного шкалування були призначені для аналізу суб'єктивних суджень, вони не містять специфіки обробки саме психологічних даних і застосовні в різного роду дослідженнях. Наприклад, їх можна використати для аналізу екологічних даних, для обробки економічної інформації, даних інженерного та технологічного характеру тощо.

У випадку, коли інформація отримана експертним шляхом, багатовимірне шкалування надає формальний апарат для вивчення поведінки експертів, дослідження питання про те, чим керуються люди, виносячи те або інше рішення. За його допомогою можна виявити фактори, що впливають на поведінку людей при порівнянні, упорядкуванні або класифікації об'єктів і побудувати модель ухвалення рішення.

Методи багатовимірного шкалування можуть використовуватись також для аналізу багатовимірних даних, тобто аналізу систем об'єктів, що характеризуються значною кількістю параметрів. Найбільш ефективно їх застосовувати, коли вдається адекватно представити вихідну інформацію, використовуючи один, два або три виміри. При цьому можна зобразити сукупність даних графічно, що дозволяє максимально використати інтуїцію дослідника. Та ж проблема встає при керуванні системою за допомогою обчислювальної техніки в режимі діалогу. Якщо рішенням, що отримане формальними методами за допомогою комп’ютера, є деякий багатовимірний масив характеристик, то при виведенні його на дисплей або на друк з'являється

необхідність понизити розмірність даних, зокрема, представити їх на площині. У такому вигляді інформація може легко сприйматися й аналізуватися людиною. Аналогічний підхід можна використати, коли досліднику доводиться приймати рішення на деякій множині альтернатив, для цього йому необхідно оцінити й зіставити між собою ці альтернативи. Доцільно користуватися методами багатомірного шкалування для аналізу експериментальних даних на попередній стадії їх обробки. Тоді дослідник може заздалегідь отримати деяку інформацію про структуру даних, побачити, на які типи розпадаються його спостереження. Після цього в різних групах можна знаходити свої закономірності та для кожного окремого типу даних будувати свою модель.

Моделі багатовимірного шкалування

В основу багатовимірного шкалування покладена ідея геометричного подання об'єктів у вигляді точок у просторі невеликої кількості вимірів.

Тут використовують два типи моделей: дистанційні й векторні. У дистанційних моделях вихідні розходження повинні бути наближені відстанями між точками, у більшості випадків використовують звичну евклідову відстань:

$$d_{jk} = [\sum_{t} (x_{jt} - x_{kt})^2]^{1/2} \tag{2.5}$$

У векторних моделях міри близькостей або зв'язків (величини, що є зворотними до розходжень) апроксимуються скалярними добутками векторів, що з'єднують точки, які відповідають об'єктам, з початком координат:

$$d_{jk} = \sum_{t} x_{jt} \cdot x_{kt} \tag{2.6}$$

При побудові конфігурації об'єктів використовується апарат лінійної або нелінійної оптимізації.

Метричний і не метричний підходи до шкалування

Наприклад, треба розмістити об’єкти в деякому метричному просторі (по можливості невисокої розмірності) таким чином, щоб по їх взаємному

розташуванню можна було створити досить добре представлення про структуру множини. Картина повинна бути такою, щоб схожі об’єкти перебували близько один біля одного, а несхожі далеко. Формально задачу багатовимірного шкалування можна поставити таким чином. Нехай задана симетрична матриця D розходжень D_{ij} між об’єктами:

$$D = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{n1} & D_{n2} & \dots & D_{nn} \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

Потрібно побудувати простір можливо меншої розмірності r і знайти координати точок – об'єктів у цьому просторі.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1r} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nr} \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

так, щоб матриця відстаней між цими точками, яка обчислена по введеній на X метриці,

$$d = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

була згідно деякому критерію близька до вихідної матриці розходжень.

Термін “багатовимірне шкалування” був введений Торгерсоном. Торгерсон перший розробив формальну процедуру, що опирається на обчислення власних значень матриці, і назвав її метричним багатомірним шкалуванням. Приблизно через десять років співробітники Мічиганського університету Кумс і Хейс створили інший метод, що використав лише рангову інформацію й давав рішення на рівні порядку. На противагу метричній процедурі Торгерсона вони назвали свій метод неметричним багатовимірним шкалуванням. Цей термін прижився й надалі використовується іншими авторами.

Розглянемо два підходи до шкалування.

Необхідно побудувати таку конфігурацію, щоб відстані між точками апроксимували безпосередньо вихідну матрицю розходжень або апроксимували

вихідну матрицю розходжень у сенсі монотонності, тобто щоб порядок відстаней збігався з порядком розходжень. Перший підхід прийнято називати метричним, оскільки вихідні розходження й результуючі відстані пов'язані метричним співвідношенням $d_{ij} = D_{ij}$. Другий підхід традиційно називають неметричним, однак йому більше відповідала б назва монотонний, оскільки він оснований на вимозі монотонного відображення $d_{ij} \leq d_{kl}$, якщо $D_{ij} \leq D_{kl}$. Конкретний вид співвідношення не визначається заздалегідь, він є одним з невідомих, які повинні бути знайдені в ході розв'язання задачі.

Ці два підходи розрізняються по постановці задач. Однак, якщо мова не йде про матрицю точних відстаней, то ні в першому, ні в другому випадку не можна побудувати ідеальне рішення, яке б не мало похибок. Тому різниця між двома рішеннями вже не настільки істотна, і ці два підходи варто лише розглядати як два різних засоби досягнення однієї й тієї ж мети.

Методи ортогонального шкалування

Проста ординація Орлочі. Найпростішим методом багатовимірного шкалування (якщо не вважати проектування в підпростір, утворений деякими з вихідних осей) є проста ординація Орлочі. Метод не вимагає складних обчислень і для малої кількості точок може бути порахований вручну. Ординація Орлочі полягає в наступному. У вихідному просторі вибираються дві найбільш віддалені одна від іншої точки A_1 й A_2. Відстань між ними $D_{12}=maxD_{ij}$. Пряма, що проходить через ці дві точки, приймається як перша вісь, другою віссю є пряма, що перпендикулярна першій та проведена через точку A_3, найбільш віддалену від прямої A_1A_2. Нехай A_1 – початок координат. Координати проекції точки A_j на площину $A_1A_2A_3$ обчислюються, виходячи з відстаней від A_j до точок A_1, A_2, A_3.

На практиці обмежуються такою кількістю осей, яка дає розкид, що покриває 70-90% дисперсії.

Недоліком простої ординації є те, що результуючий простір визначається всього по декількох точках, тому окремі ізольовані точки можуть повністю

визначити рішення. Потрібно, щоб положення площини визначалося розкидом всієї сукупності точок. Така постановка завдання буде розглядатися нижче.

Метод головних проекцій Торгерсона. Нехай задана симетрична матриця $n(n–1)/2$ відстаней. Припустимо, що вона є матрицею точних відстаней між об'єктами й не містить помилок. Будемо розглядати ці відстані між об'єктами як відстані між точками в дійсному евклідовому просторі. Задача полягає в тому, щоб визначити розмірність цього простору й проекції точок на його осі. Янг і Хаусхолдер запропонували метод для розв’язання цієї задачі.

Теорема Янга й Хаусхолдера дозволяє перевірити, чи можна розмістити розглянуту сукупність точок у дійсному евклідовому просторі, знайти розмірність цього простору й координати точок – об'єктів.

Ця теорема дозволяє побудувати метод визначення розмірності простору й проекцій об'єктів на осі цього простору для випадку, коли задана точна матриця відстаней між об'єктами. Однак на практиці найчастіше мають у своєму розпорядженні лише наближені відомості про відстані. Тоді координати точок будуть визначені з деякою похибкою. У припущенні, що дійсна розмірність істотно менше кількості об'єктів, кожна матриця B_i після факторизації дає свій результат. Він залежить від того, яка точка обрана в якості початку координат. Оскільки дані містять помилки й матриця B_i не є точною матрицею скалярних добутків, то отримані рішення не можуть бути сполучені шляхом ортогонального перетворення систем координат. Таким чином, потрібно з n точок вибрати одну в якості початку координат так, щоб рішення містило якнайменше помилок.

Одне з рішень даної проблеми, запропоноване Торгерсоном, полягає в тому, щоб помістити початок координат не в довільній точці, а в центрі ваги всіх об'єктів. Ця процедура дає єдине рішення й прагне компенсувати похибки для кожної окремої точки.

Нелінійні методи зниження розмірності даних

Нелінійні методи багатовимірного шкалування базуються на мінімізації вибраного критерію. Вибирається деяка початкова конфігурація точок в r

мірному просторі. Далі застосовується ітеративна процедура, в ході якої всі точки початкової конфігурації пересуваються так, щоб матриця евклідових відстаней між ними щонайкраще апроксимувала вихідну матрицю відстаней (розходжень) між об'єктами.

Градієнтна мінімізація. Після того як введена метрика та зафіксована розмірність простору й обрана міра розбіжності *S* між двома матрицями, процес розв'язання задачі полягає в наступному. В просторі фіксованої розмірності *r* будується початкова конфігурація точок. Це можуть бути просто проекції в підпростір, утворений якими-небудь із *r* первісних осей, або в підпростір, що відповідає *r* першим власним значенням, або, нарешті, випадкова конфігурація, у якій *nr* координат отримані за допомогою датчика рівномірно розподілених випадкових чисел. Виходячи з початкової конфігурації, знаходиться конфігурація точок, що відповідає мінімуму критерію. Функція похибки *S* залежить від *nr* невідомих координат *n* точок в *r* мірному просторі.

Для мінімізації зазвичай застосовується градієнтна процедура – метод якнайшвидшого спуску або метод сполучених градієнтів. Метод якнайшвидшого спуску складається з послідовних кроків, на кожному з яких виробляється пересування точок у напрямку антиградієнта $g_t = -\left\{\frac{\partial S}{\partial x_{ik}^t}\right\}$, а саме перехід до нової конфігурації, обумовленої координатами:

$$x_{ik}^t = x_{ik}^t - \alpha \frac{\partial S}{\partial x_{ik}^t} \Big/ \frac{\partial^2 S}{(\partial x_{ik}^t)^2} \quad , \tag{2.10}$$

де α – деякий коефіцієнт. В роботі Семмона α приймається рівним 0,3 – 0,4. В випадку критеріїв із класу S_p перша й друга часткові похідні для евклідової метрики записуються у вигляді:

$$\frac{\partial S_p}{\partial x_{ik}} = -\frac{2}{\sum\limits_{i<j} D_{ij}} \sum_{i \neq j} \frac{D_{ij} - d_{ij}}{d_{ij}} D_{ij}^p (x_{ik} - x_{jk}), \tag{2.11}$$

$$\frac{\partial^2 S_p}{\partial x_{ik}^2} = -\frac{2}{\sum\limits_{i<j} D_{ij}} \sum_{i \neq j} \left[\left(D_{ij} - d_{ij} \right) - \left(1 + \frac{D_{ij} - d_{ij}}{D_{ij}} \right) \frac{\left(x_{ik} - x_{jk} \right)}{D_{ij}} \right] / d_{ij} \cdot D_{ij}^p . \quad (2.12)$$

Метричне шкалування неметричних даних

При неметричному підході до багатовимірного шкалування потрібно, щоб відстані між точками в факторному просторі й заданих суб'єктивних розходженнях перебували в монотонному співвідношенні. Інакше кажучи, конфігурація точок – параметрів повинна бути побудована таким чином, щоб порядок відстаней між точками відповідав порядку елементів у матриці розходжень.

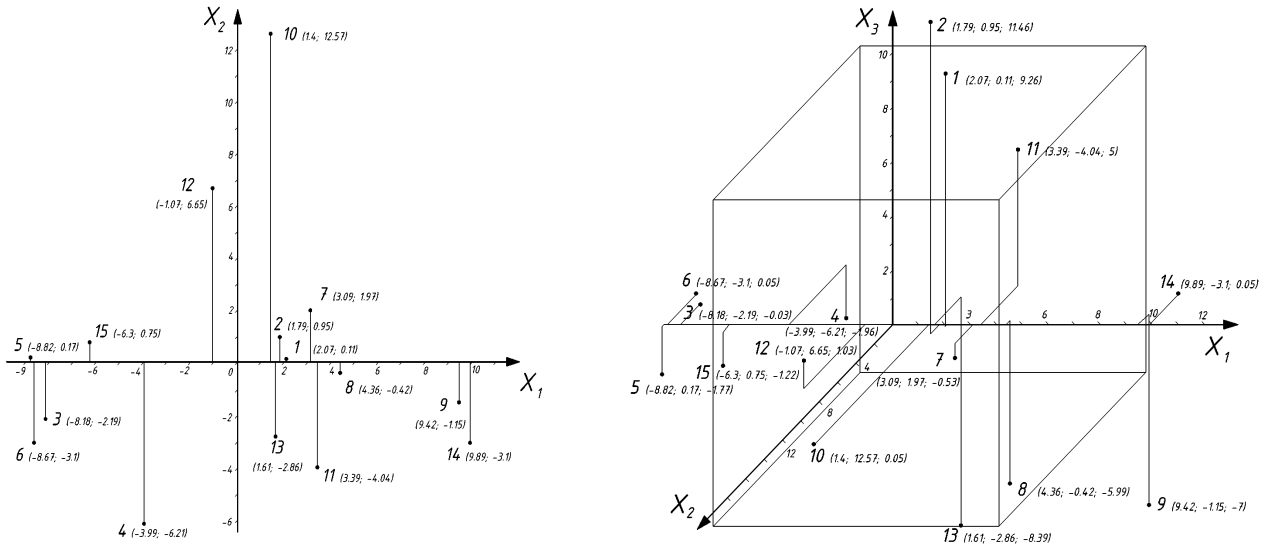
Аналіз близькостей Шепарда. Шепард уперше запропонував не метричний підхід до багатовимірного шкалування, що приводить до метричного результату. Всі попередні автори вирішували задачу шкалування в припущенні, що співвідношення між розходженнями й відстанями відомо. Іншою особливістю методу є те, що розмірність простору параметрів не оцінюється заздалегідь, а визначається, як і вид співвідношення, в ході самого аналізу.

Наведемо приклад використання багатовимірного шкалування для обробки масиву параметрів „Вхід”, значення параметрів якого представлено в таблиці 2.5.

Обробка цього масиву за допомогою методу простої ординації Орлочі дозволила виділити дев’ять незалежних осей координат. Для цього в якості початкової інформації використана матриця попарних відстаней між параметрами досліджуваних деталей. В результаті отримано матрицю координат незалежних точок в порядку зростання інформативності кожної із осей, що враховує як їх переміщення, так і їх поворот (таблиця 2.9). Таким чином досліджувані деталі, що характеризуються хімічним складом та фізико-механічними характеристиками, можна представити координатами точок в дев’яти вимірному просторі. При цьому кожна наступна координата збільшує інформативність представлення початкових даних. Із таблиці 2.10, що отримана

в результаті використання методу шкалування, видно, що сумарна похибка зі збільшенням кількості врахованих осей координат зменшується. В якості критерію вибору кількості координат точок (кількості осей координат) вибрана інформативність, що перевищує 80%. Це дозволяє зробити висновок, що всі параметри досліджуваних деталей можна представити тільки трьома координатами (трьома числами), що містять 95,7% інформації, яка закладена в початковій інформації.

На рис 2.3 наведено розташування в дво- та трьох вимірному просторах точок, що відповідають параметрам матеріалів деталей інформаційної моделі „Вхід”, значення яких надано в таблиці 2.5, а результати обробки за методом простої ординації Орлочі – в таблиці 2.9. При цьому сумарна похибка представлення параметрів матеріалів деталей точками в двовимірному просторі (таблиця 2.10) не перевищує 8,2 %, а в трьох вимірному просторі – 4,3%. Із рисунку 2.3 видно, що матеріали деталей за номерами 1 і 2 є близькими за сукупністю значень фізико-механічних параметрів та хімічному складу, а також близькими є характеристики деталей 8, 9, і 13. Тоді режими та умови обробки цих груп деталей будуть однаковими. Крім того, можна виконати заміну одного матеріалу іншим, подібним за сукупністю їх характеристик.



а) в двовимірному просторі б) в трьохвимірному просторі.

Рис. 2.3 Розташування координат точок, що характеризують хімічний склад та фізико-механічні характеристики оброблюваних деталей інформаційної моделі „Вхід”.

*Таблиця 2.9.***Значення координат точок, що характеризують параметри досліджуваних деталей**

№ деталі	Координати точок (деталей) по осях координат								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	2,07	0,11	9,26	-1,99	-4,36	3,71	0,66	-0,01	0,18
2	1,79	0,95	11,46	-0,90	0,03	-0,71	-0,03	-0,26	-0,31
3	-8,18	-2,19	-0,03	-0,58	2,05	-1,15	0,80	-0,48	-0,33
4	-3,99	-6,21	-1,96	-0,40	1,27	1,39	2,31	-0,30	0,30
5	-8,82	0,17	-1,77	-1,14	2,19	-1,22	0,84	-0,29	-0,11
6	-8,67	-3,10	0,05	-0,09	0,03	-0,71	-0,03	-0,26	-0,31
7	3,09	1,97	-0,53	-3,66	7,41	-0,71	-0,03	-0,26	-0,31
8	4,36	-0,42	-5,99	3,95	2,87	-4,06	-0,55	0,09	-0,05
9	9,42	-1,15	-7,00	5,79	0,03	-0,71	-0,03	-0,26	-0,31
10	1,40	12,57	0,05	-0,90	0,03	-0,71	-0,03	-0,26	-0,31
11	3,39	-4,04	5,00	0,97	-7,17	5,10	-0,03	-0,26	-0,31
12	-1,07	6,65	1,03	-1,34	-1,66	0,64	-2,15	0,70	0,21
13	1,61	-2,86	-8,39	0,85	0,14	-1,20	-0,71	2,02	2,14
14	9,89	-3,10	0,05	-0,90	0,03	-0,71	-0,03	-0,26	-0,31
15	-6,30	0,75	-1,22	1,15	-2,88	1,04	-1,00	0,11	-0,15

*Таблиця 2.10.***Сумарна похибка опису параметрів деталей в залежності від кількості осей координат**

	Номер вісі координат								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Сумарна похибка	20,45	8,20	4,30	2,44	1,11	0,11	0,03	0,01	0,00

Аналіз використання методів багатовимірного шкалування інформації дозволяє зробити наступні висновки:

1. Багатовимірне шкалування це сукупність методів, що дозволяють по заданій інформації про міру розходження (близькості) між об’єктами сукупності, що розглядається, приписувати кожному із цих об’єктів вектор кількісних показників, які його характеризують. При цьому розмірність координатного простору, яка визначається, попередньо задається, а “завантаження” в нього об’єктів, що аналізуються, проводиться таким чином, щоб структура взаємного розходження (близькості) між ними, які виміряні за допомогою допоміжних координат, які приписуються їм, в середньому найменше відрізнялись від заданої в сенсі того або іншого функціонала якості.

Процедуру багатовимірного шкалування доцільно використовувати, коли інформація надана в вигляді матриці попарних відстаней між об’єктами або

матриці їх порядкових відношень. В першому випадку використовуються методи так званого метричного шкалування, а в іншому – неметричного шкалування.

2. Важливою метою методів шкалування є подання наочного відображення даних в вигляді деякої геометричної конфігурації точок.

3. Розв’язання задачі шкалування як в метричному, так і в неметричному випадках неоднозначні. Вони визначаються з точністю до повороту та перенесення початку координат.

4. Обчислювальні процедури багатовимірного шкалування як в метричному, так і в неметричному випадках досить трудомісткі, але вони можуть бути достатньо просто реалізовані на сучасних комп’ютерах.

Застосування методів багатовимірного статистичного аналізу – методів факторного й компонентного аналізу та методів багатовимірного шкалування, як показали наведені приклади, дозволяє значно підвищити інформативність технологічних задач за рахунок використання максимальної сукупності початкових параметрів, спростити їх рішення за рахунок зменшення ознакового простору та скорочення обсягів оброблюваної інформації, скоротити час розв’язання різноманітних технологічних задач, знизити матеріальні та енергетичні витрати на проведення експериментальних досліджень, а також підвищити точність отримуваних рішень.

На рис. 2.4 наведено порівняльні значення розмірності масивів початкової інформації для різноманітних оброблюваних і інструментальних матеріалів та відповідної кількості латентних факторів (головних компонент), що отримані методами факторного та компонентного аналізів.

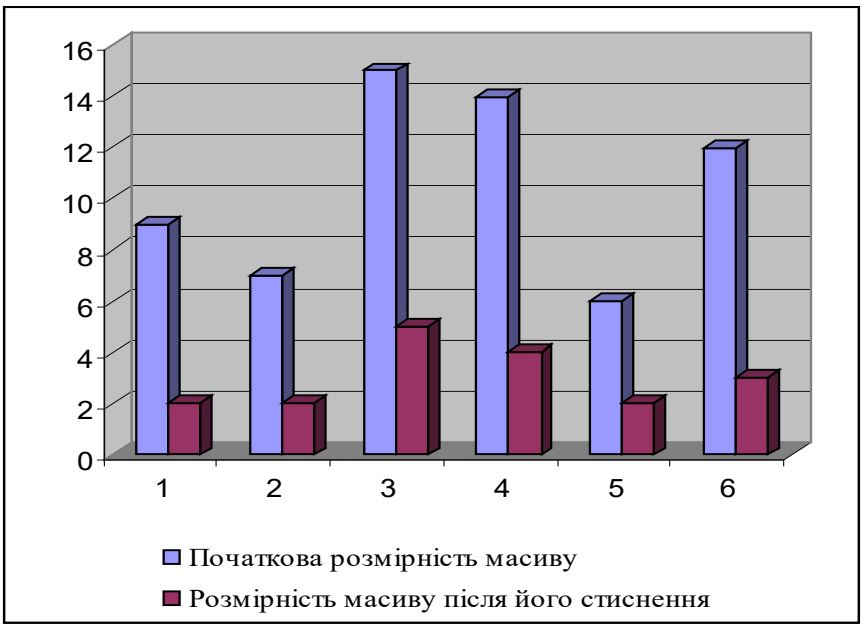


Рис. 2.4. Порівняльні значення розмірностей масивів початкової інформації до та після її стиснення (1- вуглецеві якісні конструкційні сталі; 2- вуглецеві сталі звичайної якості; 3- конструкційні леговані сталі; 4- конструкційні низьколеговані сталі; 5- тверді інструментальні сплави; 6-автоматні сталі.)

Основні методи багатовимірного статистичного аналізу формалізовані та представлені у вигляді відповідних схем алгоритмів. Ці алгоритми програмно реалізовані та апробовані при розв'язанні різноманітних технологічних задач, за результатами яких можна зробити наступні висновки:

1) методам багатовимірного статистичного аналізу інформації, що розглянуті в даному розділі, характерна математична суворість і закінченість методик;

2) запропоновані методи факторного та компонентного аналізу інформації, а також багатовимірного шкалування дозволяють зменшити (стиснути) початковий простір у 3...5 разів і скоротити час обчислення з використанням отриманих моделей в 1,5...2 рази.

3) використання методів факторного та компонентного аналізу дозволяє науково обґрунтовано забезпечити розробку нових нормативів з режимів різання матеріалів, що будуть враховувати реальні фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу та його хімічний склад;

4) розроблено алгоритми та програми факторного та компонентного аналізу, які доцільно включити в підсистему розрахунків режимів різання та нормування процесів обробки матеріалів різанням в якості програмного модуля САПР ТП, що дозволяє врахувати всі характеристики оброблюваного та інструментального матеріалів та отримати більш якісні результати технологічного проектування.

2.2. Класифікація та розпізнавання образів в задачах технологічної підготовки виробництва

Сучасне приладо- та машинобудівне виробництво є різносерійним і багатономенклатурним, характеризується частою зміною виробів, що випускаються, різної конструктивної складності. Усе це накладає особливі вимоги на проектування технологічних процесів їхнього виготовлення, зокрема за часом технологічної підготовки виробництва. Пропонується проектування технологічних процесів виконувати в автоматизованому режимі з високим рівнем автоматизації проектних робіт, максимально з огляду на особливості реального виробництва, у найкоротший термін. При цьому проектування технології доцільно здійснювати на основі технологічної уніфікації, головним напрямком якої є типізація і групова обробка. Основу технологічної і конструкторської уніфікації складає розпізнавання образів, класифікація та групування деталей, складальних одиниць та виробів за конструктивно-технологічними ознаками.

Поділ досліджуваної сукупності об'єктів або явищ на однорідні (у певному значенні) групи є завданням класифікації. Поняття „класифікація” тісно пов'язане з такими термінами як угрупування, типологізація, систематизація, дискримінація, кластеризація, і є одним з основоположних в практичній і науковій діяльності людини.

Розвиток обчислювальної техніки як засобу обробки великих масивів інформації дозволив по-новому підійти до рішення важливих завдань класифікації, а також конструктивно скористатися могутнім апаратом

багатовимірного статистичного аналізу: методами розпізнавання образів „з вчителем” (дискримінантний аналіз) і „без вчителя” (автоматична класифікація або кластерний аналіз).

В даному підрозділі розглядаються питання класифікації та розпізнавання образів методами кластерного та дискримінантного аналізу. Наведено методи класифікації та розпізнавання образів на основі використання найбільш ефективних методів групування та класифікації. Представлено приклади класифікації оброблюваних матеріалів, які використовуються при виготовленні деталей приладів. При розв’язанні задач класифікації та розпізнавання образів методом дискримінантного аналізу подано дискримінантні та класифікаційні функції, які доцільно використовувати при розв’язанні задач технологічної підготовки виробництва. В підрозділі надано опис методу прискореної класифікації без втрати точності на основі використання методів факторного та компонентного аналізу [4, 8, 24, 33, 51].

З метою розв’язання задач стиснення масивів початкової технологічної інформації без втрати інформативності, класифікації, групування та розпізнавання образів методами багатовимірного статистичного аналізу створена автоматизована система, опис віконного інтерфейсу якого наведено в цьому розділі.

В даному підрозділі також наведено результати використання методів багатовимірного статистичного аналізу для розв’язання задач технологічної підготовки виробництва при визначенні оброблюваності конструкційних матеріалів та раціональних режимів їх обробки.

2.2.1. Кластерний аналіз технологічної інформації

Методи автоматичної класифікації застосовуються в тих випадках, коли відсутні так звані навчальні вибірки. Перехід від форми початкових даних типу „об’єкт-властивості” до форми матриці попарних відстаней здійснюється за допомогою визначеного способу обчислення відстані (близькості) між парою об'єктів, коли відомі координати (значення ознак) кожного з них. Зворотний

перехід – від форми заданих початкових даних у вигляді матриці попарних відстаней (близькостей) між об'єктами до форми, що представлена матрицею „об’єкт-властивості”, здійснюється за допомогою спеціального інструментарію багатовимірного статистичного аналізу – багатовимірним метричним шкалуванням.

У загальній постановці проблема автоматичної класифікації об'єктів полягає в тому, щоб сукупність об'єктів, статистично представлених у вигляді матриць, розбити на порівняно невелику кількість (наперед відому чи ні) однорідних в певному значенні груп або класів так, щоб об'єкти, що належать до одного класу, знаходилися б на порівняно невеликих відстанях один від одного.

Для формалізації цієї проблеми зручно інтерпретувати аналізовані об'єкти як точки у відповідному ознаковому просторі. Геометрична близькість двох або декількох точок в цьому просторі визначає близькість „фізичних” станів відповідних об'єктів, їх однорідність. Отримані в результаті розбиття класи є кластерами (таксонами, образами), а методи їх знаходження – кластерним аналізом, числовою таксономією, розпізнаванням з самонавчанням [33, 51].

Існують різні підходи до створення груп: ієрархічні агломеративні, ієрархічні дивизимні, ітеративні, факторні й ін. Застосування різних методів до тих самих даних може привести до досить розрізнених результатів. З цієї сукупності кластерних методів найбільш ефективним є ієрархічний агломеративний метод, що має чотири різні методи реалізації: метод одиночного зв'язку, метод повних зв'язків, метод середнього зв’язку та метод Уорда.

Найбільш важким і найменш формалізованим елементом в задачах автоматичної класифікації є визначення поняття однорідності об'єктів. У загальному випадку це поняття характеризується або відстанню між об'єктами, або ступенем близькості цих об'єктів. Від вибору метрики (або міри близькості), значним чином залежить остаточний варіант розбиття об'єктів на класи за заданим алгоритмом його здійснення. Розв’язання цієї задачі

визначається в основному головною метою дослідження, фізичною і статистичною природою початкових параметрів, повнотою однотипних відомостей про характер імовірнісного розподілу параметрів.

В якості відстаней та мірилом близькості кількісних даних, що порівняно широко використовується в задачах кластерного аналізу використовують узагальнену („зважену") відстань махаланобиського базисного типу, звичайну евклідовута „зважену" евклідову відстань Хемінгову відстань.

Міра близькості, що описується набором дихотомічних ознак, зазвичай основана на характеристиках $V_{ij}^{(0)}$,$V_{ij}^{(1)}$та $V_{ij}= V_{ij}^{(0)}+V_{ij}^{(1)}$, де $V_{ij}^{(0)}$, $V_{ij}^{(1)}$ – кількість відповідно нульових і одиничних компонент, таких, що співпали в об'єктах X_i та X_j.

У багатьох задачах є корисним використовувати спеціальні функції від двох змінних, які називаються потенціалами.

При конструюванні різних процедур класифікації у ряді ситуацій виявляється доцільним введення поняття відстані між цілими групами об'єктів, так само, як і поняття міри близькості двох груп об'єктів. Тоді загальні відстані та міри близькості між класами об'єктів визначаються за принципами „ближнього сусіда", „далекого сусіда", по „центрах тяжіння" група на основі потенційної функції.

Наведені в цьому підрозділі методи зниження розмірності початкового факторного простору та методи ієрархічного кластерного аналізу доцільно застосовувати для класифікації та розпізнавання образів при розв'язанні різноманітних технологічних задач. Покажемо це на приклад і розроблення технології виготовлення деталі.

Будь-яку деталь, що виготовляється, можна однозначно представити у вигляді множини значень конструктивно-технологічних ознак

$$Д_i=\{З_{i1},З_{i2}, \ldots,З_{il}\},\ i=1,2,\ldots,\ m,$$

де $З_{ij}$ – значення i–ї ознаки j-ї деталі;

m - кількість розглянутих деталей;

l - кількість ознак, що характеризують кожну деталь.

Ознаки враховують, як форму, розміри і технологічні вимоги виготовлення деталей і окремих їх поверхонь, так і програму випуску, матеріал деталі, вид заготівки та ін. Ці ознаки можуть приймати як кількісні, так і якісні (булевські, бінарні) значення. На підставі значень конструктивно-технологічних ознак усі деталі, що виготовляються підприємством, можна об'єднати в окремі групи, що характеризуються спільністю конструкції, розмірів, функціонального призначення і технологічних процесів їх виготовлення. Таке об'єднання деталей у групи (кластери, таксони) доцільно виконувати методами кластерного аналізу.

З усієї сукупності деталей (об'єктів) $Д_i$, що виготовляються на конкретному підприємстві та описуваних l ознаками (властивостями), можна сформувати k груп

$$S = \{S_1, S_2, \ldots, S_k\}, 1 \le k \le m...$$

Різні варіанти розбивки об'єктів на k груп оцінюються по одному з критеріїв таксономії. Якщо ознаки (властивості) об'єкта приймають кількісні значення, тобто представляються у виді координат метричного простору, то кожен об'єкт зі своїми значеннями буде відображатися у вигляді точки цього простору. Два об'єкти з майже однаковими ознаками відображаються в дві близькі точки, а об'єкти, що дуже відрізняються ознаками, будуть представлені далеко розташованими одна від іншої точками. Згустки точок можна виділити в окремі структурні частини множини деталей – в групи (кластери, таксони). Таким чином, можна одержати опис k груп, кожна з яких поєднує деталі з близькими за значенням ознаками. Надалі кожну нову деталь, що підлягає виготовленню, можна автоматично віднести до тієї чи іншої групи. Отримана в такий спосіб група, характеризується спільністю застосовуваного устаткування, інструменту, оснащення, операцій і переходів технологічного процесу. Деталі однієї групи мають подібну геометричну форму, близькі за значеннями розміри, подібні за методом одержання заготівки, мають однакові

точність і шорсткість основних поверхонь тощо, тобто можуть виготовлятися в одному цеху, ділянці та в однакових виробничих умовах.

Задача групування деталей на класи (кластери, таксони) вважається успішною, якщо до багатомірних об'єктів, до яких можна віднести деталі, застосувати методи розпізнавання образів і, зокрема, методи кластерного аналізу. При цьому кожну деталь можна розглядати як точку в l - вимірному просторі її ознак (властивостей). Тоді кожному класу буде відповідати визначена група точок у цьому просторі.

Тому що в більшості випадків ознаки деталей мають як кількісні, так і якісні значення, то ступінь близькості між об'єктами варто визначати по кожному з цих видів ознак.

Спочатку для визначення подібності між об'єктами по якісним (логічним, бінарним) ознакам можна використовувати коефіцієнт відповідності, що обчислюється згідно формули:

$$s_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}, \tag{2.13}$$

де s_{ij} – міра подібності між об'єктами i і j, що може бути в межах від 0 до 1;

m_{ij} - кількість якісних ознак, що співпадають в об'єктах i і j;

n_{ij} - загальна кількість якісних ознак у порівнюваних об'єктах.

Добру оцінку близькості в даному випадку дає також формула Жаккара:

$$s_{ij} = \frac{k_{ij}}{n_{ij}}, \tag{2.14}$$

де k_{ij}– кількість якісних ознак, значення яких в об'єктах i та j дорівнюють 1. Потім визначається близькість об'єктів за кількісними ознаками.

Для оцінки міри близькості (подібності) об'єктів за кількісними ознаками найбільш часто застосовується критерій відстані

$$d_{ij} = \sqrt[b]{\sum_{n=1}^{l} W_{ijn}(x_{in} - x_{jn})^b}, \tag{2.15}$$

де x_{in} – значення n-го параметра об'єкта i;

b – величина, що залежить від метрики простору, в випадку евклідової метрики b=2;

W_{ijn} – відносна вага, приписувана ознаці n при порівнянні об'єктів i та j.

При наявності як кількісних, так і якісних ознак як міру відстані треба використовувати формулу Гауера, що допускає одночасне використання змінних, вимірюваних за різними шкалами:

$$d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{l} W_{ijk} C_{ijk}}{\sum_{k=1}^{ka} W_{ijk}}, \qquad (2.16)$$

де l – кількість ознак, які характеризують деталі, що виготовляються;

C_{ijk}– коефіцієнт, що визначає внесок у подібність об'єктів i та j, котрий залежить від того, чи враховується ознака k при порівнянні цих об'єктів, $0 \le C_{ijk} \ge 1$. Для бінарних ознак C_{ijk}=1, якщо значення порівнюваних ознак однакові, і C_{ijk}=0 – у протилежному випадку. Для кількісних даних значення C_{ijk} визначається згідно з формулою

$$C_{ijk} = 1 - \frac{\left| x_{ik} - x_{jk} \right|}{R_k}, \qquad (2.17)$$

де x_{ik} – значення $к$- ї ознаки в об'єкті i;

R_k – діапазон зміни значень $к$-ї ознаки.

На основі цих обчислень формується матриця відстаней D між розглянутими об'єктами, що дозволяє визначити найбільш подібний об’єкт до досліджуваного.

Після вибору деталі-аналога технологічний процес її виготовлення є основою для одержання технології виготовлення нової деталі. Отриманий таким чином технологічний процес піддається, при необхідності, корегуванню і параметричному налаштуванню, що виконується в діалоговому режимі. Корегування полягає в заміні, видаленні і перестановці операцій у

технологічному маршруті виготовлення деталі-аналога відповідно до конструктивних і технологічних особливостей деталі, що виготовляється.

Умовам технологічної уніфікації кожної операції відповідає визначений зміст переходів, устаткування, інструмент і технологічне оснащення. Тоді *i*-а операція технологічного маршруту A_i являє собою множину

$$A_i = \{O_i, Б_i, T_i\}, \tag{2.18}$$

де O_i – множина переходів, характерних *i*–тій операції;

Бі і T_i–устаткування і технологічне оснащення, що застосовуються в *i*–тій операції.

В загальному випадку множина переходів визначається як

$$O_i=\{C_i, U_i, MU_i, BU_i, P_i\}, \tag{2.19}$$

де C_i– вміст *i*-того переходу;

U_i, MU_i, BU_i– відповідно різальний, вимірювальний та допоміжний інструменти, що використовуються в *i*-тому переході;

P_i – режими виконання технологічного переходу, що обчислюються після параметричного настроювання операції.

При параметричному налаштуванні кожної операції, яка виконується в діалоговому режимі, здійснюється уточнення змісту переходів, поповнення їх вихідною змінною інформацією про параметри деталі і її окремих поверхонь, уточнення оброблюваного й інструментального матеріалів. По цих початкових даних в автоматичному режимі виконується розрахунок за відповідними формулами режимів обробки, нормування переходів та операцій. Отриманий у такий спосіб новий технологічний процес поповнює базу даних, що включає сукупність значень конструктивно-технологічних ознак деталей і відповідні технології їх виготовлення, і буде використовуватися при наступному новому технологічному проектуванні.

Наведемо приклад використання методики автоматичної класифікації автоматних та інструментальних сталей за сукупністю фізико-механічних

властивостей та хімічним складом. Для цього використано 34 найменування різноманітних сталей. Результати кластерного аналізу цих матеріалів графічно зображено у вигляді дендограми, що наведена на рис. 2.5. На цьому рисунку показано відстані часткових кластерів між собою в процесі їх поєднання. При кластеризації використано звичайну евклідову метрику за методом „ближнього сусіда”.

Іншим прикладом автоматичного об’єднання в групи за близькістю фізико-механічних характеристик є класифікація 44 різноманітних композиційних матеріалів, яку наведено на рис. 2.6.Наведені приклади показують ефективність використання автоматичної класифікації для встановлення матеріалів, що є найбільш подібні за сукупністю їх характеристик.

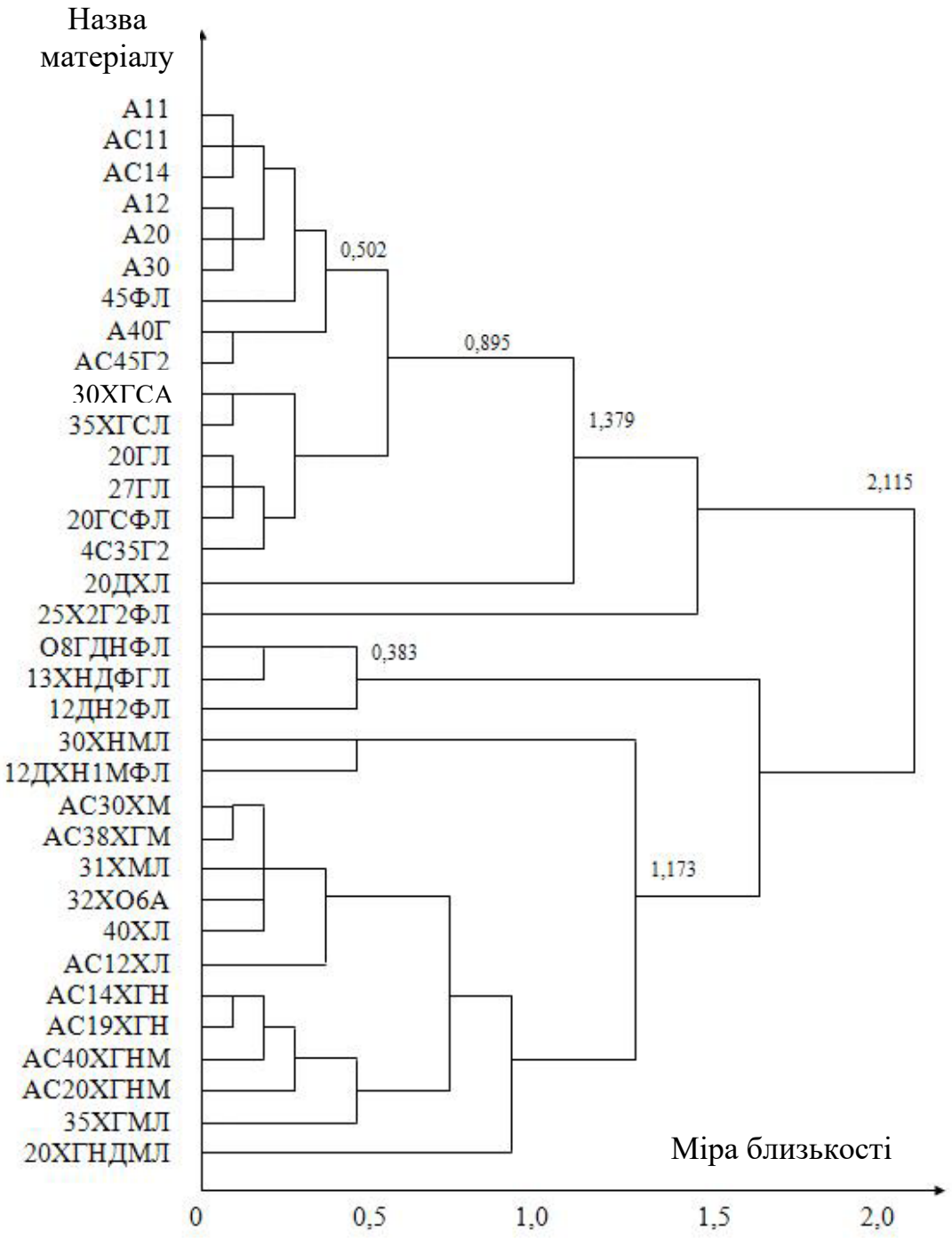


Рис. 2.5.Дендограма поєднання автоматних та інструментальних сталей в однорідні групи.

Крім того, є можливість використання результатів класифікації при необхідності заміни одного конструкційного матеріалу іншим, що є близьким до нього за сукупністю їх властивостей.

Метод $k-$ середніх зазвичай використовується при великих об'ємах n даних, що класифікуються, і реалізується за такою загальною схемою.

На першому етапі проводиться послідовне (ітераційне) уточнення місця розташування центрів тяжіння класів $\overline{X}^{(\nu)} = (\overline{X}^{(\nu)}(1),...,\overline{X}^{(\nu)}(k))$ (ν – номер ітерації, ν= 0,1,2...) з відповідним перерахунком приписуваних ним „ваг”.

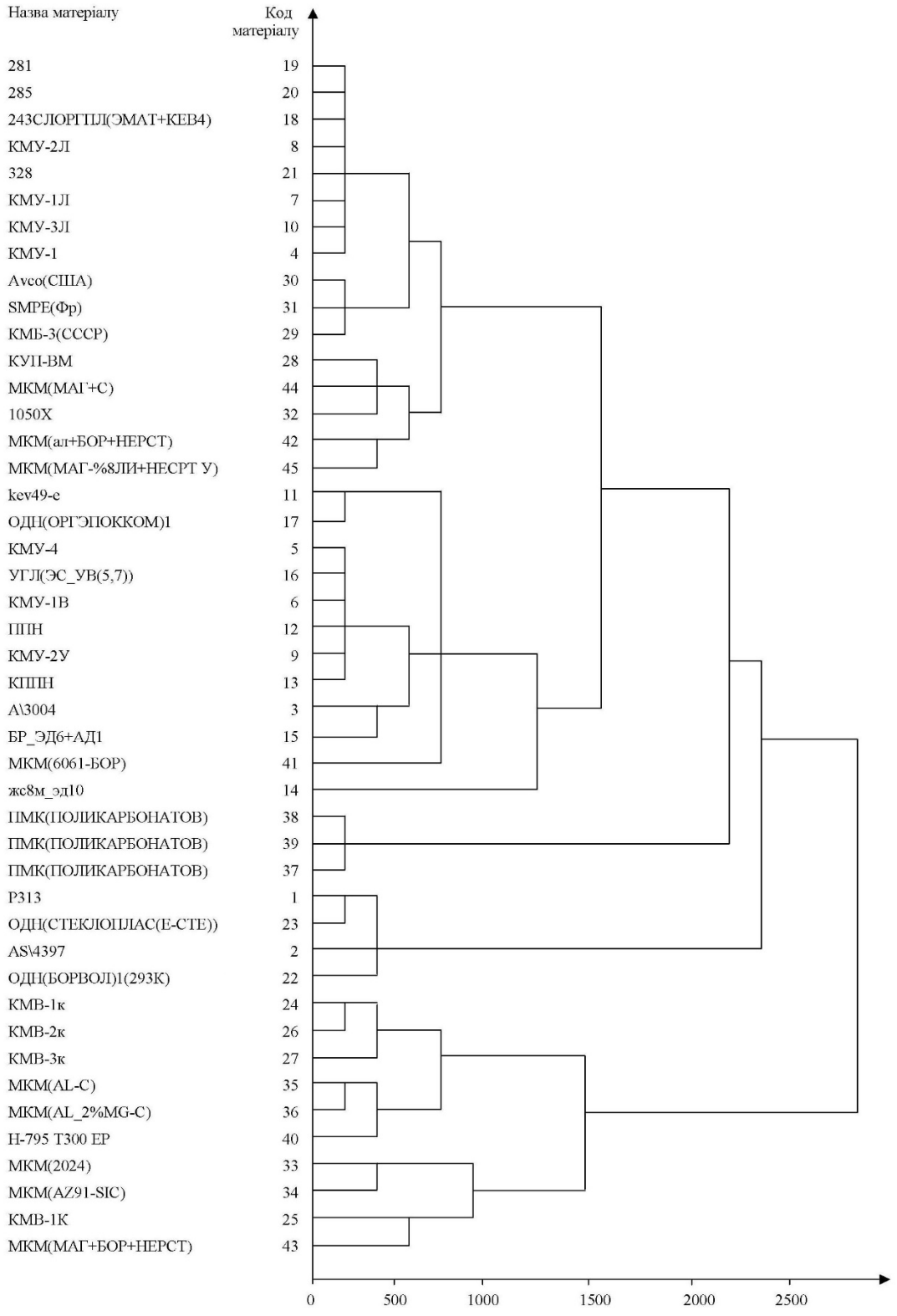


Рис. 2.6.Дендограма поєднання композиційних матеріалів в однорідні групи.

Швидка класифікація (метод *k*-середніх).Метод $k-$ середніх призначений для розбиття багатовимірних об’єктів на задану кількість k $(k<n)$ класів, однорідних в сенсі геометричної взаємної близькості елементів, що належать до одного класу. Поняття однорідності класів формалізується в даному методі за допомогою критерію якості розбиття виду

$$Q(S)=\sum_{j=1}^{k}\sum_{X_i\in S^{(j)}} d^2(X_i;\overline{X}(j)) \qquad (2.20)$$

де $S = (S^{(1)}, S^{(2)}, ..., S^{(k)})$ визначає конкретне розбиття об’єктів на k класів; $S^{(j)}$ – підмножина спостережень, що містять тільки ті спостереження, які віднесені до j-го класу; $\overline{X}(j)=\frac{1}{n_j}\sum_{X_i\in S_{(j)}} X_i$ – „центр тяжіння” j-го класу; n_j–кількість елементів в j- класі, а $d^2(X_i;\overline{X}(j))$ – квадрат евклідової відстані від об’єкта X_i до центру тяжіння $\overline{X}(j)$. Таким чином, (2.20) визначає усереднену міру внутрішньокласового розкиду об’єктів, що характеризує розбиття S.

Потім на першій ітерації „вибирається” точка X_{k+1}і з'ясовується, до якого з еталонів $\overline{X}^{(0)}(i)$ вона виявилася найближчою. Саме цей, найближчий до X_{k+1}, еталон замінюється еталоном, визначуваним як центр тяжіння старого еталону і приєднаної до нього точки X_{k+1} (із збільшенням на одиницю відповідної йому ваги), а всі інші еталони залишаються незмінними (з колишніми вагами) і т.д.

При значній кількості ітерацій або при досить великих об'ємах об’єктів, що класифікуються, n і при надто широких обмеженнях на природу досліджуваних об’єктів подальший перерахунок еталонних точок практично не приводить до їх зміни, тобто має місце збіжність (у певному значенні) $\overline{X}^{(v)}$ до деякої межі при $v\longrightarrow\infty$.

Якщо ж в якійсь конкретній задачі не досягнуто стадії практично стійких (по v) значень еталонних точок, то використовують один з двох допоміжних прийомів. Або „зациклюють” алгоритм, „проганяючи” його після розгляду останньої точки $X_n = X_{k+(n-k)}$знову через точку X_1, потім X_2, і т.д., або проводять багаторазове повторення алгоритму, використовуючи як початковий еталон $\overline{X}^{(0)}$ різні комбінації s з k точок досліджуваної сукупності і вибираючи для

подальшого фінальний еталон $\overline{X}^{(n-k)}$, що найбільш повторюється. На цьому закінчується перший етап процедури.

Другий (завершальний) етап методу $k-$ середніх є власне процедурою класифікації. Остаточне розбиття S досліджуваної сукупності багатовимірних об'єктів на k класів проводиться відповідно до правила «мінімального дистанційного розбиття» щодо центрів тяжіння (еталонів) $X = X^{(n-k)}$, а саме: об'єкти X_i відносяться до класу j_0,якщо $d(X_i, \overline{X}(j_0)) = \min\limits_{1 \le j \le k} d(X_i, \overline{X}(j))$.

Згідно з наведеною методикою розбиття досліджуваної сукупності даних S на k класів, тобто визначення координат центрів k - го таксона (центроїда) та відстані кожного елемента (об'єкта) від цього центра, розроблено схеми алгоритмів.

Алгоритм швидкого кластерного аналізу програмно реалізовано та апробовано при розв'язанні технологічних задач.

Наведемо приклад швидкої класифікації для визначення кластерів та їх центроїдів (координат центра кожного кластера) для вибірки, що включає 15 деталей, які характеризуються 17 показниками хімічного складу та фізико-механічних властивостей. Початкові дані для розрахунків наведено в таблиці 2.7підрозділу 2.2. В результаті швидкої класифікації вказаних об'єктів отримано 3 кластери, координати центрів яких показано в таблиці 2.11, значення відстаней кожного матеріалу до центру відповідного кластера наведено в таблиці 2.12, а відстань між центрами визначених кластерів – в таблиці 2.13.

Таблиця 2.11. **Координати центрів отриманих кластерів**

№ кластера	***C***	***Si***	***Mn***	***S***	***P***	***Cr***	***Ni***	***Mo***	***Fe***
1	0.46	0.30	0.74	0.030	0.053	0.060	0.167	0.381	97.605
2	0.41	0.31	0.83	0.030	0.085	0.080	0.175	0.115	97.361
3	0.21	0.12	0.59	0.022	0.047	0.050	0.142	0.105	98.698

Продовження таблиці 2.11

№ кластера	*Зерн.*	*HB*	σ_n	σ_t	σ_p	S_k	δ	ψ
1	3	200	32.33	41.68	66.63	62.92	20.75	29.71
2	4	235	38.39	47.24	75.43	58.23	26.16	28.49
3	5	148	17.65	19.63	33.45	36.94	28.49	60.53

*Таблиця 2.12.***Значення відстанейміж центрами кластерів**

№ кластера	1	2	3
1	0	37.678	78.332
2	37.678	0	109.069
3	78.332	109.069	0

Отримані результати швидкої класифікації дозволяють встановити комплексну подібність матеріалів деталей між собою за сукупністю їх характеристик, що дозволяє використовувати одні і ті ж режими їх обробки.

Вищеописані методи ієрархічної та швидкої класифікації можна успішно застосувати для групування та розпізнавання образів при розв'язанні різних технологічних задач, що наведено нижче.

Нехай відома множина конструкційних матеріалів, що використовуються на підприємстві. Кожен з цих матеріалів характеризуються сукупністю параметрів, таких як фізико-механічні властивості, хімічний склад, структура тощо. На основі вказаної інформації можна класифікувати всі конструкційні матеріали за спільністю їх технологічних характеристик та використовувати одинакові методи, умови та режими при обробці матеріалів однієї групи.

*Таблиця 2.13.***Значеннявідстанейконкретноїдеталі до центра відповідного кластера**

№ деталі	1	2	3	4	5	6	7	8
№ кластера	1	1	3	3	3	3	1	1
Відстань	12.982	23.693	8.867	11.126	12.310	13.982	21.223	20.182

Продовженнятаблиці 2.13.

№ деталі	9	10	11	12	13	14	15
№ кластера	2	1	1	1	3	2	3
Відстань	13.337	35.271	13.684	27.169	26.399	13.337	16.905

За параметрами наданого конструкційного матеріалу можна знайти групу (кластер), до якого він відноситься, та у вибраній групі знайти матеріал, що є аналогом наданого матеріалу. Цей матеріал може використовуватися для заміни даного матеріалу, що є аналогічним йому по сукупності різноманітних властивостей.

За заданими параметрами нового конструкційного матеріалу можна знайти матеріал-аналог, методи та умови його обробки доцільно взяти за основу при дослідженні оброблюваності нового матеріалу.

Всі деталі, що виготовляються на підприємстві, можна класифікувати за сукупністю конструктивних і технологічних ознак. Кожній деталі, що знаходиться в базі даних підприємства, поставлено у відповідність технологічний процес її обробки. Ідентифікувавши нову деталь, що поступає у виробництво, за сукупністю конструктивно-технічних ознак, можна знайти деталь-аналог, технологічний процес її виготовлення буде основою для створення нового технологічного процесу виготовлення деталі

2.2.2. Дискримінантний аналіз технологічної інформації

Дискримінантний аналіз є статистичним методом, що дозволяє вивчати розходження між двома і більше групами об'єктів по декількох змінних одночасно [4, 8, 16]. Він дозволяє знайти відповідь на наступні питання:

1) які з цих змінних можуть бути корисними для прогнозування;

2) які з цих змінних можуть бути зв'язані в математичну функцію для прогнозування найбільш імовірного результату;

3) яка точність прогнозування.

Основним припущенням дискримінантного аналізу є те, що існують дві або більше групи, що за деякими змінними відрізняються від інших груп. Дискримінантний аналіз допомагає виявляти розходження між групами і дає можливість класифікувати об'єкти за принципом максимальної подібності.

Дискримінантний аналіз використовується в наступних випадках. По-перше, об'єкти повинні належати до одного з двох (або більше) класів (груп).

Тут об'єкти є основними одиницями аналізу. Об'єктами вивчення можуть різні процеси, явища і взагалі все, що завгодно. Клас має бути визначений таким чином, щоб кожен об’єкт належав одному і тільки одному класу.

В практичних задачах допускаються об'єкти, які не можна віднести до якої-небудь групи. Наприклад, іноді визначену кількість об’єктів не вдається ідентифікувати, або з якоїсь причини, відкладається аналіз цих об’єктів. Такі об'єкти можна класифікувати на основі математичних функцій, отриманих з аналізу об’єктів з „відомою” приналежністю. Тому майбутні інциденти можуть розглядатися як „незгруповані” та „нерозкласифіковані”.

„Дискримінантний аналіз” є загальним терміном, що відноситься до декількох тісно пов'язаних статистичних процедур. У конкретних ситуаціях не обов'язково використовувати всі ці процедури. Їх можна розділити на методи Інтерпретації між групових розходжень і методи класифікації об’єктів за групами. Мова йде про інтерпретацію, коли розглядаються розходження між класами.

Іншими словами, при інтерпретації необхідно відповісти на питання: чи можливо, використовуючи даний набір характеристик (змінних), відрізнити один клас від іншого; наскільки добре ці характеристики дозволяють провести розрізнення і які з них найбільш інформативні. Метод, що відноситься до класифікації, пов'язаний з одержанням однієї чи декількох функцій, що забезпечують можливість віднести даний об'єкт до однієї з груп. Ці функції, називають дискримінантними, і вони залежать від значень характеристик таким чином, що з'являється можливість віднести кожен об'єкт до однієї з груп. Однак, для багатьох інших додатків підтвердити точність класифікації не представляється можливим. Дискримінантний аналіз необхідний як для розв’язання задач інтерпретації, так і для задач класифікації.

Характеристики, що застосовувались для того, щоб відрізняти один клас від іншого, називаються дискримінантними змінними. Ці змінні можуть вимірюватись або за інтервальною шкалою, або за шкалою відношень. Таким чином, стає можливим обчислення математичних очікувань, дисперсій і

правомірне використання дискримінантних змінних у математичних рівняннях. У загальному випадку, кількість дискримінантних змінних не обмежена, але в сумі кількість об'єктів має завжди перевищувати кількість змінних принаймні на два.

Однак існують певні обмеження, що стосуються статистичних властивостей дискримінантних змінних. По-перше, жодна змінна не може бути лінійною комбінацією інших змінних. Таким чином, не можна користуватись сумою змінних або їх середніми арифметичними значеннями разом із самими змінними. Відповідно неприпустимі змінні, коефіцієнт кореляції яких дорівнює 1. Змінна, що є лінійною комбінацією інших, не несе ніякої нової інформації крім тієї, котра міститься в компонентах суми, тому вона є зайвою.

Інше припущення, прийняте в багатьох випадках, полягає в тому, що коваріаційні матриці для генеральних сукупностей (генеральні коваріаційні матриці) рівні між собою для різних класів. Часто використовуваній формі дискримінантного аналізу відповідають лінійні дискримінантні функції, що є простими лінійними комбінаціями дискримінантних змінних. Цей метод найбільш елементарний, оскільки припущення про однакові коваріаційні матриці у класах спрощує формули обчислення дискримінантних функцій, а також полегшує перевірку гіпотез про статистичну значимість.

Наступне припущення стосується того, що закон розподілу для кожного класу є багатовимірним нормальним, тобто кожна змінна має нормальний розподіл при фіксованих інших змінних. Дане припущення дозволяє одержати точні значення імовірності приналежності до даного класу і критерію значимості. При порушенні припущення про нормальність розподілу значення імовірності обчислити точно вже не можна, але відповідні оцінки можуть бути отримані й у даному випадку.

Наведені вище припущення для дискримінантного аналізу фундаментальні. Якщо експериментальні дані для деякої конкретної задачі не цілком задовольняють цим припущенням, то статистичні висновки не будуть точним відображенням реальності.

Звідси видно, що дискримінантний аналіз використовується для вивчення розходжень між групами за визначеним набором дискримінантних змінних. Розглядаючи класи як значення деякої фіксованої змінної, що вимірювалась по шкалі найменувань (коли кожному класу дано своє позначення), дискримінантний аналіз представляється як метод зіставлення декількох інтервальних змінних однією номінальною змінною.

Якщо в конкретній ситуації класифікуючі змінні можна вважати залежними від дискримінантних змінних, то ця задача буде аналогічною задачі множинної регресії. Основна відмінність їх полягає в тому, що в дискримінантному аналізі залежна змінна вимірюється за шкалою найменувань (класів). Але коли передбачається, що значення дискримінантних змінних залежать від класів, дискримінантний аналіз є узагальненням багатовимірного дисперсійного аналізу. Це типово для задач, у яких приналежність змінних до деякого класу викликає зміни одночасно в декількох змінних.

У дискримінантному аналізі прийняті наступні позначення: g - кількість класів; p - кількість дискримінантних змінних; n_i - кількість об'єктів (спостережень) класу i; n - загальна кількість об'єктів усіх класів.

З урахуванням математичних припущень, що прийняті в дискримінантному аналізі, в моделі дискримінантного аналізу повинно бути: два або більше класів: $g=2$; принаймні два об'єкти в кожному класі: $n_i=2$; будь-яка кількість дискримінантних змінних за умови, що вона не перевершує загальну кількість об'єктів за винятком двох: $0 < p < (n_i-2)$; вимір дискримінантних змінних по інтервальній шкалі; лінійна незалежність дискримінантних змінних; приблизна рівність між коваріаційними матрицями для кожного класу (якщо не використовуються спеціальні формули); багатовимірна нормальність закону розподілу дискримінантних змінних для кожного класу.

Канонічна дискримінантна функція є лінійною комбінацією дискримінантних змінних і задовольняє визначеним умовам. Вона має таке математичне представлення:

$$f_{km} = u_1 x_{1km} + u_2 x_{km} + ... + u_p x_{pkm} \quad (2.21)$$

де f_{km}– значення канонічної дискримінантної функції для m-го об'єкта в групі k;

x_{ikm}–значення дискримінантної змінної x_i для m-го об'єкта в групі k;

u_i– коефіцієнти, що забезпечують виконання необхідних умов поділу об’єктів на групи.

Коефіцієнти u_i для першої функції вибираються таким чином, щоб її середні значення для різних класів якнайбільше відрізнялися один від одного. Коефіцієнти другої функції вибираються аналогічно, тобто відповідні середні значення повинні максимально відрізнятися за класами, при цьому накладається додаткова умова, щоб значення другої функції були некорельовані із значеннями першої, також третя функція повинна бути некорельована з першими двома і т. д. Максимальна кількість дискримінантних функцій, яку можна одержати описаним способом, дорівнює кількості класів без одиниці або кількості дискримінантних змінних, у залежності від того, яка з цих величин менша.

Для класифікації, що виконуєтьсяна основі інформації, яка міститься в дискримінантних змінних, використовується класифікаційна функція. Вона має такий вигляд:

$$h_k = b_{k0} + b_{k1} x_1 + b_{k2} x_2 + ... + b_{kp} x_p, k=1,\ldots,g, \quad (2.22)$$

де h_k – значення функції для класу k;

b_{ki}– коефіцієнти, які визначають вплив i – го параметра на значення k – ї класифікаційної функції.

2.2.3. Використання методів дискримінантного аналізу для дослідження технологічних характеристик конструкційних матеріалів

За допомогою методів дискримінантного аналізу можна вирішувати різноманітні технологічні задачі. Так, наприклад, його можна використовувати для визначення раціональних умов та методів обробки нових конструкційних матеріалів методом запозичення. Всі конструкційні матеріали, що

використовуються на підприємстві, групуються за хімічним складом, фізико-механічними властивостями, структурою та іншими параметрами. За допомогою методів дискримінантного аналізу досліджуваний матеріал відноситься до однієї з запропонованих груп, а далі у цій групі вибирається матеріал-аналог, що за сукупністю своїх властивостей близький до досліджуваного. Умови і методи обробки матеріалу-аналога є початковими для досліджуваного матеріалу та уточнюються шляхом проведення короткочасних експериментів. Крім того, запропоновану методику визначення умов і методів обробки нових конструкційних матеріалів можна використовувати для вирішення задачі іншого типу, коли потрібно в умовах реального виробництва замінити один матеріал на інший, що дуже схожий за сукупністю властивостей.

Для дослідження технологічних характеристик конструкційних матеріалів з використанням методів дискримінантного аналізу були сформовані наступні класи конструкційних матеріалів: 1) вуглецеві та леговані сталі; 2) жаростійкі сталі; 3) мідь та сплави; 4) алюмінієві сплави; 5) чавуни.

В якості технологічних характеристик вказаних матеріалів були вибрані параметри, які дають найбільше розходження за класами, а саме: його хімічний склад – вуглець, кремній, сірка, нікель, мідь, залізо, алюміній та фосфор; механічні властивості – границя міцності під час розтягування і відносне видовження під час розірвання.

В результаті обробки цих даних були отримані такі функції класифікації:

$$h_1 = -37250.2 - 348.9 \cdot x_1 - 85562.9 \cdot x_2 + 2057.1 \cdot x_3 - 1121.1 \cdot x_4 - 1165.5 \cdot x_5 - \\ - 3744.1 \cdot x_6 - 83962.5 \cdot x_7 + 16770.6 \cdot x_8 + 57.1 \cdot x_9 + 878.1 \cdot x_{10}, \quad (2.23)$$

$$h_2 = -34454.7 - 98.1 \cdot x_1 - 82145.1 \cdot x_2 + 1972.4 \cdot x_3 - 645.1 \cdot x_4 - 1155.1 \cdot x_5 - \\ - 3341.4 \cdot x_6 - 80631.3 \cdot x_7 + 16113.3 \cdot x_8 + 330.8 \cdot x_9 + 1245.8 \cdot x_{10}, \quad (2.24)$$

$$h_3 = -41721.4 - 164.1 \cdot x_1 - 89548.9 \cdot x_2 + 1541.1 \cdot x_3 - 2721.5 \cdot x_4 - 1132.6 \cdot x_5 - \\ - 5781.5 \cdot x_6 - 87680.6 \cdot x_7 + 17240.7 \cdot x_8 + 34.3 \cdot x_9 + 1665.8 \cdot x_{10}, \quad (2.25)$$

$$h_4 = -37210.2 + 77.2 \cdot x_1 + 84214.5 \cdot x_2 - 2830.8 \cdot x_3 - 478.7 \cdot x_4 + 424.9 \cdot x_5 + \\ + 2209.3 \cdot x_6 + 82234.9 \cdot x_7 - 16649.2 \cdot x_8 - 1204.8 \cdot x_9 - 1308.5 \cdot x_{10}, \quad (2.26)$$

$$h_5 = -38288.0 - 640.4 \cdot x_1 - 86078.5 \cdot x_2 + 2330.4 \cdot x_3 - 340.7 \cdot x_4 - 1103.2 \cdot x_5 - \\ - 3017.1 \cdot x_6 - 84527.1 \cdot x_7 + 17015.9 \cdot x_8 + 1173.6 \cdot x_9 + 581.9 \cdot x_{10}, \quad (2.27)$$

де x_1, ..., x_{10} – дискримінанті змінні, що характеризують хімічний склад матеріалів (кількість вуглецю *C*, кремнію *Si*, сірки *S*, нікелю *Ni,* міді *Cu,* заліза *Fe*, алюмінію *Al* та фосфору *P*), а також границю міцності під час розтягування R_m та відносне видовження *A* під час розірвання.

З метою перевірки правильності попередньої класифікації матеріалів в виконано їх групування за допомогою розробленої програми, що показала їх відповідність. Також там наведено приклад використання методик дискримінантного аналізу при розв'язанні задачі визначення матеріала-аналога для заміни одного матеріалу іншим з максимально подібними властивостями.

Для дослідження технологічних характеристик конструкційного матеріалу з метою оптимізації умов його обробки був вибраний матеріал з характеристиками, що наведені у таблиці 2.14.

Таблиця2.14. **Хімічний склад та фізико-механічні властивості досліджуваного матеріалу**

Назва параметру		**Значення параметру**
x_1	1. Вуглець, *C*	0,09 %
x_2	2. Кремній, *Si*	0,17 %
x_3	3. Сірка, *S*	0,035 %
x_4	4. Нікель, *Ni*	3,25 %
x_5	5. Мідь, *Cu*	0,2 %
x_6	6. Залізо, *Fe*	94,89 %
x_7	7. Алюміній, *Al*	0,0 %
x_8	8. Фосфор, *P*	0,035 %
x_9	9. Границя міцності під час розтягування, R_m	980 *МПа*
x_{10}	10. Відносне видовження під час розірвання, *A*	10 %

В результаті дослідження цього матеріалу за допомогою отриманої функції класифікації була визначена група матеріалів, до якої відноситься досліджуваний матеріал (таблиця 2.15). З цієї таблиці видно, що даний матеріал належить до першого класу (леговані сталі).Імовірність приналежності досліджуваного матеріалу за класами дана в таблиці 2.16.

Із знайденого класу був визначений матеріал з найбільш близькими

властивостями – це сталь марки 12ХН3А. Властивості досліджуваного матеріалу та матеріалу-аналогу представленні у таблиці 2.17. З цієї таблиці видно, що властивості досліджуваного матеріалу та матеріалу-аналогу сталі 12ХН3А практично співпадають.

Дослідження можливості заміни одного конструкційного матеріалу іншим за сукупністю їх хімічних та фізико-механічних властивостей методами дискримінантного аналізу показують, що запропонований метод багатофакторного статистичного аналізу дає позитивні результати. Це дозволяє при виробничій необхідності замінити один матеріал іншим без погіршення експлуатаційних характеристик деталі, що виготовляється з нього.

Таблиця 2.15. **Значення функцій класифікації для досліджуваного матеріалу**

Класи	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Значення функцій класифікації	37783,215	37574,141	36064,848	-110974,9	37163,387

Таблиця 2.16. **Імовірності приналежності досліджуваного матеріалу**

Класи	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Імовірність	0,7152	0,1821	0,0285	0,0003	0,0739

Таблиця 2.17. **Порівняльна таблиця властивостей досліджуваного матеріалу та матеріалу-аналогу**

Назва параметру		**Досліджуваний матеріал**	**Матеріал-аналог 12ХН3А**
x_1	1. Вуглець, *C*	0,09 %	0,125 %
x_2	2. Кремній, *Si*	0,17 %	0,27 %
x_3	3. Сірка, *S*	0,035 %	0,025 %
x_4	4. Нікель, *Ni*	3,25 %	2,95 %
x_5	5. Мідь, *Cu*	0,2 %	0,2 %
x_6	6. Залізо, *Fe*	94,89 %	95,21 %
x_7	7. Алюміній, *Al*	0,0 %	0,0 %
x_8	8. Фосфор, *P*	0,035 %	0,025 %
x_9	9. Границя міцності під час розтягування, R_m	980 *МПа*	930 *МПа*
x_{10}	10. Відносне видовження під час розірвання, *A*	10 %	11 %

Наведемо результати використання дискримінантного аналізу для класифікації „з вчителем” конструкційних матеріалів, що використовуються в приладобудуванні. При цьому отримані дискримінантні функції, за допомогою яких можна визначити ті параметри, що найбільш впливають на поділ

матеріалів на окремі групи (кластери). В загальному виді дискримінантні функції представлені залежностями:

$$f_{km} = u_1 x_{1km} + u_2 x_{km} + ... + u_p x_{pkm}, \quad (2.28)$$

де f_{km}— значення канонічної дискримінантної функції для m-го параметра в групі конструкційних матеріалів;

x_{ikm}— значення дискримінантної змінної x_i для m-го параметра в групі k; u_i– коефіцієнти, що забезпечують виконання необхідних умов поділу матеріалів на групи (кластери);

k. – кількість груп, на які поділяються конструкційні матеріали;

p – кількість параметрів (хімічний склад та фізико-механічні властивості), що характеризують конструкційні матеріали.

Класифікаційні функції для кожного кластера, які доцільно використовувати при розв'язанні задач розпізнавання образів, тобто визначенні групи (кластера), до якого відноситься досліджуваний об'єкт, представлено в такому виді:

$$h_k = b_{k0} + b_{k1} x_1 + b_{k2} x_2 + ... + b_{kp} x_p, k=1,\ldots,g, \quad (2.29)$$

де h_k– значення функції для групи k;

b_{ij} – коефіцієнти, які визначають вплив j – го параметра на значення i – тої класифікаційної функції;

g – кількість груп (кластерів), на які поділяються конструкційні матеріали.

Результати дискримінації вуглецевих сталей, які поділяються на три групи (кластери) наведено в таблиці 2.18,. а значення коефіцієнтів класифікаційних функцій – в таблиці 2.19. В якості параметрів дискримінації та класифікації використано такі характеристики вуглецевих сталей як вуглець C, марганець Mn, кремній S_i; фосфор P; сірка S; хром Cr; верхня границя плинності R_{eH}, границя міцності під час розтягування R_m, відносне видовження під час розірвання A, відносне звуження під час розірвання Z, ударна в'язкість

KCU, границя плинності під час непропорційного видовження $R_{p0,2}$, твердість по Бринелю *HB*, оброблюваність *obr* та істинний опір розриву S_k.

Таблиця2.18. **Значення дискримінантних змінних для вуглецевих конструкційних сталей**

№ п.п.	Найменування параметру	Дискримінантні змінні	
		Функція 1	Функція 2
1	*C*	-0,826	1,527
2	*Mn*	0,203	-0,079
3	*Si*	0,323	-0,287
4	*P*	-7,477	0,056
5	*S*	7,670	-0,161
6	*Cr*	0,264	-0,742
7	R_{eH}	0,189	-0,445
8	R_m	-0,261	0,608
9	*A*	-0,421	1,759
10	*Z*	0,301	-1,564
11	*KCU*	-0,025	0,262
12	$R_{p0,2}$	0,001	0,714
13	*HB*	0,922	-1,001
14	*obr*	0,108	-0,154
15	S_k	0,142	-0,346

Із наведеної таблиці видно, що на поділ вуглецевих конструкційних сталей на два кластера в першу чергу впливають вміст фосфору *P*, сірки *S*, вуглецю *C* та твердість сталі *HB*. В той же час найбільший вплив на поділ цих сталей на три групи мають вміст вуглецю *C*, значення відносного видовження під час розірвання *A*, відносного звуження під час розірвання *Z* та твердість матеріалу *HB*.

Результати дослідження легованих конструкційних сталей, що виконані за допомогою методів дискримінантного аналізу, наведено в таблицях 2.20 та 2.21. Ці сталі попередньо представлено в вигляді 4 груп. У вказаних групах, окрім використовуваних у вуглецевих сталях параметрів, використано вміст нікелю *Ni*, міді *Cu*, ванадію *V*, алюмінію *Al*, титану *Ti*, молібдену *Mo*, ніобію *Nb*, свинцю *Pb* та азоту *N*.

Таблиця 2.19. **Значення коефіцієнтів класифікаційних функцій для вуглецевих конструкційних сталей**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти класифікаційних функцій		
		Група 1	**Група 2**	**Група 3**
1	*C*	-1112,050	-68,893	-945,906
2	*Mn*	231,286	-0,691	178,335
3	*Si*	774,285	3,243	616,259
4	*P*	504799,033	-5739,523	382182,423
5	*S*	1573947,483	16886,799	1192346,87
6	*Cr*	1582,691	-23,997	1402,913
7	R_{eH}	2,342	0,113	2,042
8	R_m	-2,083	0,0262	-1,797
9	*A*	-13,586	-1,047	-13,060
10	*Z*	3,725	0,308	3,764
11	*KCU*	-1.486	1.066	-2.325
12	$R_{p0,2}$	0,375	-0,00798	-0,743
13	*HB*	4,429	0,254	3,612
14	*obr*	43,393	6,411	36,754
15	S_k	70,541	-3,956	60,824
16	Константа b_{k0}	29084,494	-23,066	16693,373

Таблиця2.20. **Значення дискримінантних змінних для легованихконструкційних сталей**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти дискримінантних функцій		
		Функція 1	**Функція 2**	**Функція 3**
1	*C*	-0,366	0,242	-0,189
2	*Mn*	0,150	0,409	0,226
3	*Si*	-0,061	0,131	-0,046
4	*P*	0,263	-0,055	-0,123
5	*S*	0,567	-0,679	0,378
6	*Cr*	0,337	0,007	0,248
7	*Ni*	0,073	0,204	-0,035
8	*Cu*	0,213	0,277	-0,272
9	*V*	0,178	-0,075	0,053
10	*Nb*	0,058	0,031	0,031
11	*Al*	0,016	0,008	0,001
12	*Ti*	-0,059	-0,104	0,008
13	*Mo*	-0,157	-0,224	-0,319
14	*Pb*	-0,380	-1,377	-0,254
15	*N*	0,099	0,057	0,073
16	R_{eH}	-1,064	2,729	1,622
17	R_m	1,088	-3,027	-0,985
18	*A*	1,146	0,175	0,728
19	*Z*	-2,047	-0,100	-0,048
20	*KCU*	0,609	0,186	0,091
21	$R_{p0,2}$	-0,267	1,170	-0,418
22	*HB*	0,277	0,071	-0,118
23	*obr*	-0,258	-0,268	-0,156
24	S_k	0,059	0,236	0,228

Таблиця 2.21. **Значення коефіцієнтів класифікаційних функцій для легованих конструкційних сталей**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти класифікаційних функцій			
		Група 1	**Група 2**	**Група 3**	**Група 4**
1	*C*	35,331	97,946	38,334	82,375
2	*Mn*	48,850	37,189	30,133	40,118
3	*Si*	0,634	4,039	-2,730	4,190
4	*P*	819,129	494,355	764,097	716,901
5	*S*	182,541	-68,563	251,584	-36,459
6	*Cr*	28,005	13,677	21,270	17,159
7	*Ni*	5,368	3,584	2,556	5,067
8	*Cu*	52,032	22,656	25,211	54,658
9	*V*	20,230	-36,067	11,206	-15,931
10	*Nb*	208,694	7,188	65,601	79,888
11	*Al*	-8,887	-11,534	-10,610	-10,060
12	*Ti*	6,760	16,963	19,074	10,113
13	*Mo*	-13,355	16,285	21,900	16,271
14	*Pb*	-70,441	139,289	318,390	28,214
15	*N*	165,799	-255,034	-147,825	-130,025
16	R_{eH}	-0,215	0,240	-1,331	-0,289
17	R_m	0,283	-0,153	1,357	0,168
18	*A*	5,228	-0,160	2,388	1,406
19	*Z*	-3,124	2,821	-0,776	-0,178
20	*KCU*	4,794	0,531	2,448	2,567
21	$R_{p0,2}$	-0,615	-0,256	-1,737	0,084
22	*HB*	0,0297	-0,0334	0,00111	0,01051
23	*obr*	-8,993	1,588	-13,354	-7,259
24	S_k	7,262	6,198	18,000	9,244
25	Константа b_{k0}	-146,208	-124,555	-133,696	-93,205

Надані вище результати використання дискримінантного аналізу для дослідження технологічних параметрів конструкційних матеріалів дозволяють зробити висновок про ефективність методів багатовимірного статистичного аналізу при технологічній підготовці машино- та приладобудівного виробництва.

2.2.4. Класифікація шляхом зниження розмірності

Статистичні методи зниження розмірності початкового простору параметрів з подальшим його відновленням і використанням методик, що викладені в підрозділі 2.2, дозволяють розробити алгоритм класифікації без втрати точності поділу об’єктів на класи, які є близькими по сукупності значень параметрів.

Нехай деяка технологічна інформація представлена у вигляді прямокутної матриці X розмірності $n*\ell$, елементами якої в загальному випадку є дійсні числа $x_{i,j}$. Стовпцями цієї матриці є множина векторів

$$S = \{S_1, S_2, S_3,\ldots,S_\ell\} \tag{2.30}$$

Кожний з цих векторів S_i, $i = 1, 2,\ldots,\ell$ відповідає деякому об'єкту, який описується набором ознак, тобто

$$S_j = (x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \ldots, x_{nj}), j = 1, 2, \ldots, b... \tag{2.31}$$

Таким чином, інформаційна матриця X рівнозначна множині стовпців S, що складаються з об'єктів, кожний з яких характеризується набором з n ознак. Тоді міра близькості об'єктів S_i і S_j, що належать S, буде дорівнювати

$$R(i,j) = \varphi(S_i,S_j) = \varphi((x_{1i}, x_{2i},\ldots, x_{ni}),(x_{1j}, x_{2j}, \ldots, x_{nj}))... \tag{2.32}$$

В якості такої міри може бути обрана відстань по Хеммінгу, Евклідова відстань, відстань Махаланобіса тощо. Після введення граничної оцінки близькості на множині S всіх пар об'єктів, визначається функція близькості згідно з порогом b як

$$\Gamma(i,j) = \begin{cases} 0, _\ якщо\ _\ R(i,j) > b, \\ 1, _\ якщо\ _\ R(i,j) \le b \end{cases} \tag{2.33}$$

Обчисливши значення $\Gamma(i, j)$ при $i, j = 1, 2,\ldots,\ell$,$i \neq j$, одержимо матрицю оцінок близькості Γ між об'єктами на множині S. Тоді задача класифікації об'єктів на підмножини (класи) полягає у визначенні таких груп об'єктів, щоб кожен об'єкт належав одному з таких класів. Для цього можна використовувати один з відомих алгоритмів класифікації.

Перехід з вихідного ℓ - вимірного ознакового простору в m – вимірний факторний (при $m<<\ell$) варто виконувати в три етапи відповідно до принципів класичного факторного аналізу.

Використовуючи методику факторного аналізу кожен елемент вихідної матриці X представимо у вигляді лінійної комбінації значень схованих (латентних) факторів

$$x_{ij} = a_{i1}f_{1j} + a_{i2}f_{2j} + a_{i3}f_{3j} + \ldots + a_{in}f_{nj}, \qquad (2.34)$$

де a_{ip}– значення факторних навантажень при p – му факторі;

f_{pj} – значення фактора F_p у *і-го* об'єкта; $j = 1, 2, \ldots, \ell$; $i = 1, 2, \ldots, n$...

Послідовність визначення факторних навантажень a_{ip} наведена в підрозділі 2.1

Початковою для факторного аналізу є кореляційна матриця R, елементи якої визначаються як

$$r_{ik} = \frac{1}{e}\sum_{j=1}^{e} x_{ij}^{н} x_{kj}^{н}, \qquad (2.35)$$

де r_{ik} – коефіцієнт кореляції i-тої та $к$-тої ознак;

$x_{ij}^{н}$ – нормоване значення i- ї ознаки.

Для визначення розмірності факторного простору m усі власні значення $\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_n$ кореляційної матриці розташовуються в порядку їх спадання

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \ldots > \lambda_m > \ldots > \lambda_n. \qquad (2.36)$$

За розмірність факторного простору приймається номер m останнього власного значенняλ, що не менше 1, тобто $\lambda_{m+1} \geq 1$, а $\lambda_{m+1} < 1$.

Контроль правильності вибору значення m здійснювався згідно з наступною нерівністю

$$\frac{1}{e}\sum_{p=1}^{m} \lambda_p \geq 0{,}80. \qquad (2.37)$$

Для перетворення вихідного ознакового простору у факторний необхідно кожному об'єкту, представленому значеннями ознак, з деяким ступенем

точності скласти набір значень факторів. Для виразу (1.34) скористаємося методом повної оцінки з метою визначення f_{pj}, p = 1, 2, …, m, j = 1, 2, …, n... . множинного регресійного аналізу відомо, що рівняння регресії, яке зв'язує фактори й ознаки, має наступний вигляд

$$f_{pj} = \beta_{p1} \cdot x_{1j} + \beta_{p2} \cdot x_{2j} + \ldots + \beta_{pn} \cdot x_{nj}, \tag{2.38}$$

де p = 1, 2, ..., m; β_{pj} – коефіцієнти регресії, що обумовлені системою рівнянь

$$\begin{gathered} r_{11}\beta_{p1} + r_{12}\beta_{p2} + \ldots + r_{1n}\beta_{pn} = T_{1p} \\ r_{21}\beta_{p1} + r_{22}\beta_{p2} + \ldots + r_{2p}\beta_{pn} = T_{2p} \\ \ldots \\ r_{n1}\beta_{p1} + r_{n2}\beta_{p2} + \ldots + r_{np}\beta_{pn} = T_{np}, \end{gathered} \tag{2.39}$$

де $T_{ip} = r_{xi,\ Fp}$ – коефіцієнти кореляції ознак з факторами. У випадку некорельованих факторів можна вважати, що

$$r_{xi,\ Fp} = a_{ip},\ \ i = 1, 2, \ldots, n;\ p = 1, 2, \ldots m... \tag{2.40}$$

Розв’язавши систему лінійних рівнянь (2.39) з врахуванням (2.40), отримаємо оцінку значень факторів f_{pj} у всіх об'єктів. Таким чином, з деякою похибкою, обумовленою переходом до меншої розмірності n, ми одержимо відображення ℓ - вимірного ознакового простору в m- вимірне факторне. Це є основою класифікації об'єктів в отриманому факторному просторі. При цьому кожному стовпцю вихідної матриці X, що складається з ℓ елементів (ознак), буде відповідати стовпець матриці F, що складається з m елементів – значень факторів, з відносними внесками в загальну дисперсію ознак (V_1, V_2, …, V_m). На наступному кроці обчислень усі фактори f_{pj} нормуються щодо їх максимальних значень згідно з індексом j

$$f^*_{pj} = \frac{f_{pj}}{\max(f_{p1}, f_{p2}, \ldots, f_{pl})}, \tag{2.41}$$

$$p = 1, 2, \ldots, m;\ j = 1, 2, \ldots, \ell.$$

Надалі індекс * для простоти запису будемо опускати.

Далі, згідно з алгоритмом, вводиться m- вимірний вектор ваг факторів

$$W^f = (W_1^f, W_2^f, \ldots, W_m^f), \tag{2.42}$$

де W_i^f – вага i- го фактора, $0 \le W_i^f \le 1$, $i = 1, 2, \ldots, m$...

Як міру близькості двох об'єктів $S_1^f, S_2^f \in S^f$, $i \neq j$ по k-му фактору вибираємо функцію від абсолютної величини різниці значень цього фактора в даних об'єктах

$$r_k^f(i, j) = W_k^f \varphi (f_{ki} - f_{kj}) \tag{2.43}$$

У явному вигляді функція φ представляється за допомогою граничних оцінок за факторами

$$\xi^f = \xi^f(\xi_1^f, \xi_2^f, \ldots, \xi_m^f), \quad 0 \le \xi_i^f \le 1, \; i = 1,2,\ldots,m\ldots$$

як

$$r^f{}_k(i, j) = \begin{cases} 0, _ \text{якщо} _ |f_{ki} - f_{kj}| > \xi^f{}_k, \\ W_k^f, _ \text{якщо} _ |f_{ki} - f_{kj}| \le \xi^f{}_k \end{cases} \tag{2.44}$$

Близькість двох об'єктів S_i^f і S_j^f для будь-яких $i, j = 1, 2, \ldots, \ell$; $i \neq j$ визначається як

$$R^f(i, j) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} r^f{}_k(i, j), \tag{2.45}$$

при $0 \le R^f(i, j) \le 1$.

За допомогою введеної граничної оцінки близькості об'єктів b^f, $0 \le b^f \le 1$, визначимо бінарну функцію близькості на множині всіх пар об'єктів

$$\Gamma^f(i, j) = \begin{cases} 0, _ \text{якщо} _ R^f(i, j) < b^f, \\ 1, _ \text{якщо} _ R^f(i, j) \ge b^f \end{cases} \tag{2.46}$$

Близькість довільного об'єкта $S_i^f \in S^f$ до заданої множини об'єктів K^f, де $K^f \in S^f$ є деяка множина об'єктів на S^f,

$$K^f = \{S_1^f, S_2^f, \ldots, S_{n^1}^f\}, \quad n^1 \le n ,$$

яку визначимо за формулою

$$R^f(i,k) = \frac{1}{n'} \sum_{j \in k} \Gamma^f(i,j), \qquad 0 \le R^f(i,k) \le 1 \tag{2.47}$$

При цьому вводиться гранична оцінка d^f, $0 \le d^f \le 1$ і на множині всіх підмножин об'єктів з S^f визначається бінарна функція близькості для довільного об'єкта $S_l^f \in S^f$ та довільної підмножини $K^f \in S^f$,

$$\Gamma^f(i,k) = \begin{cases} 0, _ якщо _ R^f(i,k) < d^f , \\ 1, _ якщо _ R^f(i,k) \ge d^f \end{cases} \tag{2.48}$$

Об'єкт S_l^f, $(S_l^f \in S^f)$ належить до підмножини об'єктів K^f згідно з узагальненим фіксованим порогом U^f, $U^f = U^f(\xi_1^f, \xi_2^f, \ldots, \xi_m^f, b^f, d^f)$, якщо $\Gamma^f(i,k) = 1$ та $S_l^f \notin K^f$ - у протилежному випадку.

Формування класифікаційних груп (підмножин K^f) здійснюється в два етапи. На першому етапі виконується попередня класифікація $K^f = \{K_1^f, K_2^f, \ldots, K_r^f\}$... Для цього в першу групу (групу K_1^f) заноситься об'єкт S_1 та всі об'єкти $S_i \in S$, що задовольняють умові $F^f(i,K^f) = 1$. Потім ця процедура повторюється для інших об'єктів, формуючи групу K_2^f і т.д.

Виключення залежності розбивки на групи від порядку стовпців у вихідній матриці здійснюється на другому етапі класифікації. Тут для кожного елемента $S_l^f \in S^f$ визначається

$$R^f(i, K_s^f) = max\ \{R^f(i, K_1^f), R^f(i, K_2^f), \ldots, R^f(i, K_r^f)\}\ldots \tag{2.49}$$

Якщо $R^f(i, K_s^f) \ge b$, то стовпець S_l^f відноситься до групи K_s^f. Ця процедура повторюється для всіх елементів множини S^f.

Таким чином, варіюючи вектором U^f, одержимо множину A^f, що складається з ℓ стійких класифікацій

$$A^f = \{K_1^f(U_1^f), K_2^f(U_2^f), \ldots, K_\ell^f(U_\ell^f)\}\ldots$$

Однак, ця класифікація у факторному просторі трохи відрізняється від точної класифікації в просторі ознак. Для її уточнення необхідно повернути вектор граничних оцінок U_i^f назад в ознаковий простір і ще раз застосувати той же алгоритм класифікації, але вже з вектором U_i^x, тобто розбити множину S на класи, але вже в просторі ознак. В результаті цього ті об'єкти, що у зв'язку з втратою точності через застосування факторного аналізу неправильно розподілені по класах, будуть перерозподілені, і ми одержимо шуканий точний розподіл об'єктів множини S^x на класи.

Викладений вище метод класифікації об'єктів дозволяє зменшити (стиснути) вихідний простір у 2...5 разів і скоротити час обчислень у 1,5 ... 2 рази.

Питання для самоконтролю

1. Що розуміють під інформативністю технологічної інформації?
2. Які основні джерела технологічної інформації використовуються у приладобудуванні?
3. Які проблеми виникають при роботі з великими інформаційними масивами?
4. У чому полягає необхідність зниження розмірності даних?
5. Які методи підвищення інформативності даних застосовуються в інженерних задачах?
6. Які переваги використання інформаційних технологій у технологічній підготовці виробництва?
7. Які переваги використання інформаційних технологій у технологічній підготовці виробництва?
8. Що таке факторний аналіз?
9. Яка основна мета факторного аналізу?
10. У чому полягає сутність латентних факторів?
11. Які задачі приладобудування розв’язуються за допомогою факторного аналізу?

12. Що таке факторне навантаження?
13. Які етапи проведення факторного аналізу?
14. Які переваги має факторний аналіз при обробці технологічної інформації?
15. Які недоліки факторного аналізу?
16. Яка мета компонентного аналізу?
17. Що таке головна компонента?
18. Які математичні основи компонентного аналізу?
19. У чому полягає відмінність між факторним і компонентним аналізом?
20. Як визначається кількість головних компонент?
21. У яких задачах технологічної підготовки виробництва використовується компонентний аналіз?
22. Яка мета багатовимірного шкалування?
23. Які типи багатовимірного шкалування існують?
24. Які метрики використовуються у багатовимірному шкалуванні?
25. Які задачі машинобудування можна розв'язувати методом багатовимірного шкалування?
26. У чому полягають переваги візуалізації багатовимірних даних?
27. Які недоліки багатовимірного шкалування?
28. Що таке класифікація технологічної інформації?
29. Які задачі розпізнавання образів виникають у машинобудуванні?
30. Які типи класифікації існують?
31. Які методи машинного навчання застосовуються у технологічній підготовці виробництва?
32. Які критерії якості класифікації?
33. Як визначається похибка класифікації?
34. Наведіть сутність кластерного аналізу?
35. Яка мета кластеризації?
36. Які методи кластерного аналізу існують?
37. Які метрики відстані використовуються у кластерному аналізі?

38. У чому полягає метод k-середніх?
39. Які переваги і недоліки ієрархічної кластеризації?
40. Як оцінюється якість кластеризації?
41. Які задачі приладобудування розв’язуються методами кластерного аналізу?
42. Які програмні засоби використовуються для кластерного аналізу?
43. Що таке дискримінантний аналіз?
44. Яка мета дискримінантного аналізу?
45. Що таке дискримінантна функція?
46. Які етапи проведення дискримінантного аналізу?
47. У чому полягає різниця між кластерним і дискримінантним аналізом?
48. Які задачі класифікації розв’язуються дискримінантним аналізом?
49. Які переваги дискримінантного аналізу?
50. Які програмні засоби підтримують дискримінантний аналіз?
51. Як дискримінантний аналіз використовується для класифікації матеріалів?
52. Які параметри матеріалів можуть бути ознаками класифікації?
53. Які переваги застосування дискримінантного аналізу в матеріалознавстві?
54. Як оцінюється достовірність результатів класифікації?
55. Які перспективи використання штучного інтелекту в дослідженні матеріалів?
56. У чому полягає класифікація шляхом зниження розмірності?
57. Які методи зниження розмірності використовуються для класифікації?
58. Як зниження розмірності впливає на точність класифікації?
59. Як оцінюється ефективність методів класифікації?
60. Які задачі машинобудування потребують класифікації багатовимірних даних?
61. Які сучасні інформаційні технології використовуються для автоматизованої класифікації?

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

В розділі розглянуто різноманітні методи математичного моделювання технологічних параметрів. Враховуючи особливості задач технологічної підготовки виробництва, на перший план висунуто проблему декомпозиції технологічних систем для спрощення процесу отримання загальної моделі досліджуваного процесу на основі моделей його складових частин.

В розділі наведено особливості використання чисельних методів моделювання, експериментально-статистичних методів (методів регресійного аналізу та планування експериментів), методів теорії подібностей та аналізу розмірностей, фрактального аналізу, а також сучасних ефективних методів моделювання – методів евристичної самоорганізації моделей (методу групового врахування аргументів (МГВА), нечіткого МГВА та методів штучних нейронних мереж). Наведено алгоритми вказаних методів та приклади використання цих методів моделювання при розв'язанні технологічних задач. Дано рекомендації з використання методів математичного моделювання, переваги і недоліки наведених методів [8, 15, 22].

3.1. Основи побудови математичних моделей

В більшості випадків розв'язання задач технологічної підготовки виробництва пов'язане з оптимізацією, тобто із знаходженням найкращих в деякому сенсі значень різноманітних показників технологічної системи. Для пошуку оптимальних значень параметрів технологічного об'єкта формується деякий критерій оптимізації (цільова функція) $F(X)$, що залежить від вектора керованих вхідних змінних $X=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Тоді задача оптимізації зводиться до визначення таких значень $x^*_1, x^*_2, ..., x^*_n$, при яких цільова функція $F(X^*)$, що відображає економічні, технологічні, конструктивні та інші показники технологічного об'єкта, тобто вихідні змінні y_j, $j=1, 2, \ldots, m$, досягає екстремуму (максимуму або мінімуму). Для розв'язання цієї задачі треба мати

математичний опис, що дозволяє вирішити задачу оптимізації аналітичним шляхом або чисельними методами.

В реальних умовах технологічної підготовки виробництва об’єкти дослідження носять ймовірний характер, тому для отримання математичного опису характеристик об’єктів доцільно використовувати експериментально-статистичні методи. У випадках, коли об’єктивної інформації недостатньо або ж постановка експериментів для отримання математичного опису на об’єкті неможлива, використовують експертну інформацію, яка повинна оброблюватись об’єктивними методами її формалізації.

Зміна стану технологічного об’єкту (технологічний процес, технологічне обладнання тощо) здійснюється під впливом керуючих та збурюючих дій, а також залежить від початкових умов і може бути адекватно представлена розв’язанням системи рівнянь

$$\tilde{y} = f(y, u, \eta); \quad y = \{y_1, y_2, \ldots, y_m\}; u \in U; \quad \eta \in \theta, \tag{3.1}$$

де y – вектор станів об’єкта;

u – вектор керуючих дій;

η – вектор збурюючих дій;

U – множина допустимих дій;

θ – множина збурюючих дій.

У випадку якщо технологічний об'єкт має єдиний математичний опис (3.1) і єдину постановку задачі оптимального керування при всіх умовах функціонування, застосовується режим одноразової ідентифікації, при якому процес збирання інформації має фіксоване закінчення, а модель будується один раз після завершення експериментів. В багатьох випадках аналітично одержати математичні моделі не завжди представляється можливим. Тому для побудови математичного опису технологічних процесів застосовують експериментальні моделі дослідження, які базуються на математичній статистиці, коли результати можуть розглядатися як випадкові величини.

Невідповідність передумови про єдиний математичний опис реальним особливостям технологічного процесу приводить до зниження якості продукції, що виготовляється, і вимагає додаткових витрат на корегування технології. Економічні втрати, пов'язані з неадекватним математичним описом прагнуть зменшити шляхом проектування технології на базі порівняно „грубих" моделей, поступово уточнюючи їх і підвищуючи якість технології за рахунок безперервного поповнення експериментальних даних. Такий шлях виправданий, коли відбувається безперервна зміна параметрів об'єкта, наприклад дрейф параметрів, характеристики яких невідомі. У випадку, якщо математичні моделі, що відповідають визначеним умовам, відрізняються за структурою або дискретними значеннями параметрів, перебудова моделі й алгоритмів вимагає набору нових експериментальних даних, а отже, у цей період з'являються економічні витрати, пов'язані зі зниженням імовірності виготовлення якісних виробів. Тому виникає потреба оцінки області та доцільності використання наявних методів математичного моделювання параметрів і ефективності застосування при моделюванні новітніх сучасних методів.

3.1.1. Декомпозиція технологічних об'єктів

Технологічні об'єкти в більшості випадків є складними системами, що характеризуються значною кількістю вхідних факторів та вихідних параметрів і складними взаємозв'язками між ними. Тому дослідження технологічних об'єктів з метою їх моделювання та оптимізації доцільно виконувати шляхом декомпозиції їх як складних систем на складові елементи (блоки, підсистеми), які зберігають при подальшій композиції підсистем всі властивості початкової системи.

Основна мета розбивки повної системи на елементи, блоки та підсистеми полягає в побудові обмеженого набору співвідношень між характеристиками системи. В загальному випадку для повної складної системи ця задача виявляється непосильною. Тому звичайно доводиться ділити систему на

невелику кількість елементів, математичний опис яких може бути виконано.

Для визначеності процесу декомпозиції вводять чисельну міру складності моделі. В основу цієї міри покладено трудомісткість синтезу моделі, тобто витрати, необхідні для створення моделі. Цю міру називають складністю системи. Складність на стадії аналізу (стадії „чорної скриньки") повинна враховувати лише кількість входів n і виходів m моделі (для простоти не будемо розрізняти керовані й некеровані входи). Нехай складність має вигляд $L=L(n,\ m)$. Наприклад, $L=n^{\gamma}m$, де $\gamma>1$, тому що кількість входів сильніше впливає на складність, ніж кількість виходів. Величину γ варто визначати залежно від того, у скільки разів збільшується трудомісткість синтезу моделі при збільшенні числа її входів на одиницю.

Функцію складності в деяких випадках можна вважати адитивною, тобто якщо модель об'єкта складається з декількох (g)підсистем, то загальна складність дорівнює сумі складностей цих підсистем, тобто $L=\sum_{i=1}^{g} L_i$, де L_i-складність i-ї підсистеми вихідного об'єкта.

З огляду на викладене вище, процес декомпозиції моделі можна розглядати як процес мінімізації її складності, тобто як рішення наступної задачі мінімізації:

$$L_{\partial} \rightarrow \ min \Rightarrow D^*,\ D^* \in \{D\}\ , \tag{3.2}$$

де D – операція декомпозиції;

$\{D\}$– множина припустимих варіантів декомпозиції;

D^* – оптимальна декомпозиція, що мінімізує складність L системи, яка підлягає декомпозиції.

На рисунку 3.1 наведено схему декомпозиції технологічного процесу обробки металів різанням на дві різні підсистеми ПС1 та ПС2 N різними способами. Це означає, що множина $\{D\}$складається з N різних варіантів, для яких кількості зв'язків k й q приймають різні значення. Якісною декомпозицією варто вважати ту, в якій ці кількості мінімальні. Дійсно, використовуючи наведену вище міру складності, одержуємо:

$$L\,(k,\,q) = (n+q)^{\gamma}\,k + k^{\gamma}(m+q). \qquad (3.3)$$

Оптимальною декомпозицією D^* з $\{D\}$буде та, котра мінімізує $L(k,\,q)$. Нехай D_i–i-та декомпозиція, що визначається двома числами:

$$D_i = \langle k_i,\, q_i \rangle,\; i=1,\ldots,N\,. \qquad (3.4)$$

Рішення одержуємо у вигляді $D^* = D_i$, якщо

$$L\,(k_i,\,q_i) = min\{L(k_i,\,q_i)\},\;\; i=1,...,N. \qquad (3.5)$$

Таким чином, мета декомпозиції моделі полягає, насамперед, у тому, щоб спростити наступний синтез моделі об'єкта „розщепленням" її на більш прості елементи. Цей процес повинен здійснюватися з урахуванням апріорної інформації про структурні особливості об'єкта декомпозиції.

Так, для технологічного процесу різання в якості елементів вхідного вектора X в схемі декомпозиції (рис. 3.1) використано режими та умови металообробки поверхонь деталей, вектора A – усадка стружки, складові сили різання, температура в зоні різання, контактні навантаження в інструменті тощо, вектора B – пружний стан поверхневого шару, циклічна міцність різального інструменту, залишкові напруги, міцність та стійкість різального інструменту тощо. В якості вихідних параметрів процесу різання (елементів вектора Y) використано шорсткість та точність обробленої поверхні, технологічна собівартість обробки, продуктивність процесу різання тощо.

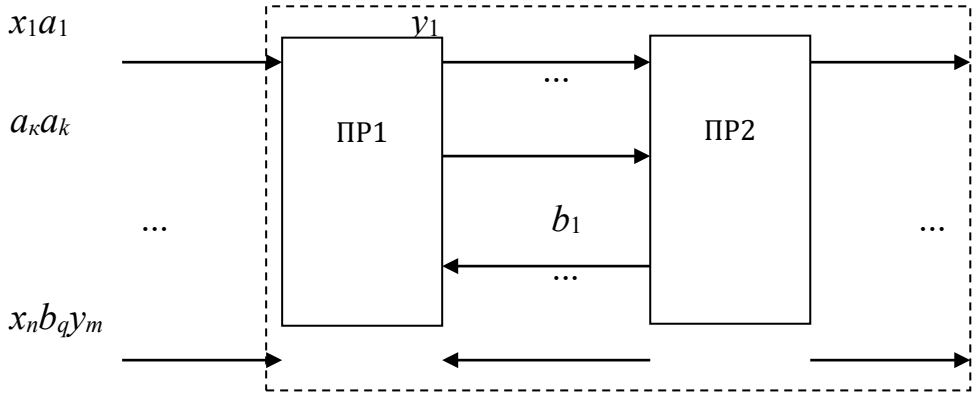


Рис. 3.1 Схема декомпозиції технологічного процесу різання як складної системи на два елементи

3.2. Чисельні методи моделювання

3.2.1. Інтерполяція функцій

Характер досліджуваного процесу, кількість вхідних та вихідних параметрів та їх взаємозв'язки впливають на вид моделі, метод її отримання й швидкодію програми при її виконанні на комп'ютері. Завдяки швидкодії та простоті отримання лінійні моделі широко застосовуються розроблювачами, хоча більшість досліджуваних процесів є нелінійними. Прикладом лінійної моделі є залежність між подачею при обробці металів різанням та шорсткістю обробленої поверхні, хоча це справедливо в обмеженому діапазоні вказаних параметрів [1. 3, 10, 18. 19, 20].

Лінійність або нелінійність стосовно вхідних параметрів – це не те ж саме, що лінійність або нелінійність вихідних змінних (функцій) за параметрами. Оператор A{ } і модель, що задає його, будуть лінійними, якщо для системи справедливий принцип суперпозиції. Він полягає в тому, що лінійній комбінації довільних вхідних параметрів ставиться у відповідність та ж лінійна комбінація параметрів на виході із системи:

$$A\{\sum_{i=1}^{n} C_i x_i\} = \sum_{i=1}^{n} C_i A\{x_i\} = \sum_{i=1}^{n} C_i \eta_i .$$

Математичну модель із використанням лінійного оператора можна записати у вигляді $\eta = AX$.

Нелінійні рівняння, у свою чергу, можна розділити на два підкласи: алгебраїчні (у яких над змінними виконуються тільки дії додавання, віднімання, множення, ділення й піднесення в ступінь із раціональним показником) і трансцендентні, в які входять інші функції в якості змінних (показникові, тригонометричні тощо.). В кожному разі складність моделі істотно залежить від числа рівнянь і від виду функцій, які в них входять. Звичайно найпростіше розв'язуються алгебраїчні рівняння 1-ї степені (лінійні), складніше – трансцендентні. Прикладом лінійного рівняння є залежність періоду стійкості

різального інструменту T від режимів різання, яка після логарифмування набуває такий вигляд:

$$lnT = lnC - a_v lnV - a_s lns - a_t lnt,$$

де C – коефіцієнт, що залежить від оброблювального та інструментального матеріалів;

V, s, t – швидкість, подача та глибина різання відповідно;

a_v, a_s, a_t – показники степенів при відповідних параметрах режимів різання.

На практиці кількість різноманітних комбінацій режимів різання і рівнянь, по яких ведеться розрахунок, становить кілька сотень, тому розв'язання таких задач вручну отримати досить важко.

В моделях технологічних процесів, крім рівнянь, можуть бути й нерівності:

$$R_a = (2{,}23351 - 0{,}25009x_1 - 0{,}41903x_2 - 0{,}2549x_3 - 0{,}57639x_4)^2 \le Ra_{зад}$$

Наприклад, треба визначити режими різання, які забезпечують мінімальне значення технологічної собівартості обробки деталі

$$C = b_n + \tau\left[a_T + \frac{m_2}{T}\right],$$

в області, що задана обмеженнями:

$$Ra \le Ra_{зад};$$

- $s_{min} \le s \le s_{max}$; $n_{min} \le n \le n_{max}$.

Наведені співвідношення являють собою математичну модель технологічного процесу різання з врахуванням обмежень на процес різання .

В математичних моделях часто використовують ряд нелінійних математичних структур, у першу чергу, це степеневі поліноми.

Методи інтерполяції дають можливість істотно спростити способи визначення коефіцієнтів степеневого полінома при наявності точних даних про

вхідні й вихідні параметри. Наприклад, для даних з рівновіддаленими значеннями незалежної змінної x при виборі математичної структури використовують першу та другу інтерполяційні формули Ньютона

$$P(x) = y_o + \frac{\Delta y_o}{1!h}(x - x_o) + \frac{\Delta^2 y_o}{2!h^2}(x - x_o)(x - x_1) + ... + \frac{\Delta^n y_o}{n!h^n}(x - x_o)...(x - x_{n-1}) \text{ та}$$

$$P(x) = y_n + \frac{\Delta y_{n-1}}{1!h}(x - x_n) + \frac{\Delta^2 y_{n-2}}{2!h^2}(x - x_n)(x - x_{n-1}) + ... + \frac{\Delta^n y_o}{n!h^n}(x - x_n)...(x - x_1),$$

де h – крок інтерполяції; $\Delta^i y_o$ –різниця i–го порядку.

Ввівши позначення $g = (x - x_o)/h$, отримаємо інтерполяційний поліном Гауса для рівновіддалених $2n$ точок інтерполяції:

$$P(x) = y_o g\Delta y_o + \frac{g(g-1)}{2!}\Delta^2 y_{-1} + ... + \frac{(g+n-1)g+n-2-...)...(g-n)}{(2n)!}\Delta^{2n} y_{-n}.$$

Модифікаціями зазначених поліномів є інтерполяційні поліноми Стерлінга

$$P(x) = y_o + g\frac{\Delta y_{-1} + \Delta y_o}{2} + g^2\frac{\Delta^2 y_{-1}}{2} + ... + \frac{g(g^2 - 1^2)}{3!} \times$$
$$\times \frac{\Delta^3 y_{-2} + \Delta^3 y_{-1}}{2} + ... + \frac{g(g^2 - 1^2)(g^2 - 2^2)...[g^2 - (n-1)^2]}{(2n)!}\Delta^{2n} y_{-n}$$

і Беселя

$$P(x) = \frac{y_0 + y_1}{2} + \left(g - \frac{1}{2}\right)\Delta y_o + \frac{g(g-1)}{2}\frac{\Delta^2 y_{-1} + \Delta^2 y_o}{2} + ...$$

Для нерівно віддалених вузлів інтерполяції використовують інтерполяційний поліном Лагранжа

$$P(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i \frac{(x - x_o)(x - x_1)...(x - x_{i-1})(x - x_{i+1})...(x - x_n)}{(x_i - x_o)(x_i - x_1)...(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})...(x_i - x_n)}.$$

Окрім інтерполяційного полінома Лагранжа при наявності нерівно віддалених вузлів інтерполяції використовують також спеціальні інтерполяційні поліноми Ньютона інтерполяції вперед та назад:

$P_n(x)=f(x_0)+(x-x_0)f(x_0,x_1)+(x-x_0)(x-x_1)f(x_0,x_1,x_2)+ \ldots +(x-x_0)\ldots(x-x_{n-1})f(x_0,x_1,\ldots,x_n)$ та

$P_n(x)=f(x_n)+(x-x_n)f(x_n,x_{n-1})+(x-x_n)(x-x_{n-1})f(x_n,x_{n-1},x_{n-2}+\ldots+(x-x_n)\ldots(x-x_1)f(x_n,x_{n-1},\ldots,x_j)$

В основу цих поліномів покладено використання розділених різниць, $(k+1)$– й порядок якої має такий вигляд:

$$f(x_i,x_{i+1},\ldots,x_{i+k},x_{i+k+1}) = (f(x_{i+1},x_{i+2},\ldots,x_{i+k+1}) - f(x_i,x_{i+1},\ldots,x_{i+k}))/(x_{i+k+1}- x_i).$$

Особливе місце серед відомих математичних структур займають ортогональні поліноми]. Найбільш часто використають ті ортогональні поліноми Чебишева, що визначені для проміжку [-1, +1]. Поліном Чебишева першого роду представляється виразом

$$P(x) = \frac{a_o}{2} T_o(x) + a_1 T_1(x) + a_2 T_2(x) + ...,$$

де значення $T_i(x)$ визначаються згідно з виразом

$$T_i(x) = \cos i \arccos x, i = 0,1,2,...$$

При змінних x у проміжку $[-\infty,+\infty]$ використовується поліном Ерміта

$$P(x) = a_o H_o(x) + a_1 H_1(x) + a_2 H_2(x) + ...,$$

де $$H_i(x) = (-1)^i e^{x^2} d^i e - x^2 / dx^i; i = 0,1,2,....$$

Для періодичних функцій використовують тригонометричні поліноми

$$P(x) = a_o + \sum_{i=1}^{n} (a_i \cos ix + b_i \sin ix).$$

Інтерполяційні поліноми Лагранжа та Ньютона на всьому відрізку [a, b] з використанням великої кількості вузлів інтерполяції часто призводять до поганого наближення, що можливо пояснити великим накопиченням похибок в процесі обчислення. Крім того, через розбіжність процесу інтерполяції збільшення кількості вузлів не обов'язково призводить до підвищення точності. Для того, щоб уникнути великих похибок, весь відрізок [a; b] розбивають на часткові відрізки та на кожному з часткових відрізків наближено замінюють початкову функцію $f(x)$ многочленом невеликої степені, тобто здійснюють кусково-поліноміальну інтерполяцію. Одним із способів такої інтерполяції є використання сплайн-функцій. Ці функції, що визначені на відрізку [a, b],

мають визначену кількість безперервних похідних. Перевагою використання сплайн-функцій перед звичайною інтерполяцією є їх краща збіжність та стійкість процесу обчислень. Як кусково-поліноміальну інтерполяцію за допомогою сплайнів найбільш часто використовують кубічні сплайн-функції, що мають такий вигляд:

$$S_i(x) = + bi(x\text{-}x_i) + \frac{c_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x - x_i)^3,\ \ x_{i-1} \le x \le x_i,\ i=1,2,\ldots,n\ ,$$

де a_i, b_i, c_i, d_i – коефіцієнти часткових сплайн-функцій.

Кожна з математичних структур має свою специфіку, що й визначає область її застосування при моделюванні. Інтерполяційні поліноми використовуються для моделювання об'єктів з відомими залежностями або з точними даними про значення вхідних і вихідних параметрів.

3.2.2 .Апроксимація функцій методом найменших квадратів

Розглянуті методи інтерполяції забезпечують аналітичне представлення функції, що задана в табличному вигляді на невеликому інтервалі з кількома вузлами інтерполяції. Якщо треба отримати апроксимуючу функцію при значній кількості аргументів, то підвищення степені поліному інтерполяції ускладнює обчислення та збільшує похибку. Крім того, процес обчислення різниць є нестійким, тобто незначні похибки в значеннях функції призводять до того, що різниці високих порядків практично будуть мати випадковий характер. Тому більш ефективним методом отримання математичних моделей є її середньоквадратичне наближення до реальної функції методом найменших квадратів [18, 19, 20,40].

Суть методу найменших квадратів полягає в мінімізації квадрата різниці реального значення функції $f(x_q)$ та значень апроксимуючої функції $\Phi(x_q)$ в кожній із n опорних точок:

$$E_q = (f(x_q) - \Phi(x_q))^2 \to \min, \qquad (3.6)$$

де E_q - величина похибки апроксимації;

$f(x_q)$ - початкова (реальна) функція; $\Phi(x_q)$ - апроксимуюча функція;

$q = 1,2,...,n$, n - кількість контрольних (опорних) точок, що використовуються при апроксимації.

Апроксимуюча функція $\Phi(x)$, згідно з цим методом, є системою незалежних функцій в деякій обмеженій області, тобто

$$\Phi(x) = \sum_{r=1}^{p} Kr \cdot \varphi_r(x), \tag{3.7}$$

де K_r- коефіцієнт, що визначається з умови мінімуму E_q; $\varphi_r(x)$- незалежні функції, що вибираються із набору елементарних функцій; p – кількість функцій, що використовується в задачі апроксимації.

Для знаходження мінімуму значення E_q слід продиференціювати вираз (3.7) по кожному з невідомих коефіцієнтів K_r. В результаті отримаємо систему з m - незалежних рівнянь з m - невідомими.

Оскільки система складається з лінійних рівнянь, то для її розв'язання доцільно використати один із відомих чисельних методів, наприклад метод Жордана-Гаусса. Розв'язавши цю систему щодо невідомих K_r, отримаємо значення коефіцієнтів апроксимуючої функції та загальний її вигляд.

Адекватність отриманих математичних моделей реальним процесам, що моделюються, визначається за однорідністю оцінок дисперсій адекватності і відтворюваності закритерієм Фішера.

Як приклад, покажемо використання методу найменших квадратів при отриманні математичної моделі зносу інструменту при токарній обробці $H(V, s, t, \tau)$.Тут V – швидкість різання; s – подача; t – глибина різання; τ - час різання. Апроксимуюча функція є функцією декількох змінних $\Phi(X)= H(V, s, t, \tau)$, вона представляється в вигляді добутку степеневих функцій:

$$\Phi(X) = H(V,s,t,\tau) = C_0 \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4}$$

або $$\Phi(X) = H(V,s,t,\tau) = 2^{a0} \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4} ,$$

де $a_0 = \log_2 C_o$.

Така заміна необхідна для отримання лінійної системи рівнянь.

Після логарифмування обох частин рівняння даного виразу отримаємо

$$\ln(H(V,s,t,\tau)) = \ln(2^{a0} \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4});$$

$$\ln(H(V,s,t,\tau)) = a_0 \cdot \ln 2 + a_1 \cdot \ln V + a_2 \cdot \ln s + a_3 \cdot \ln t + a_4 \cdot \ln \tau.$$

Запишемо вираз E для визначення похибки апроксимації:

$$E = \sum_{q=1}^{z} (\ln(H_q - (a_0 \cdot \ln 2 + a_1 \cdot \ln V_q + a_2 \cdot \ln s_q + a_3 \cdot \ln t_q + a_4 \cdot \ln \tau_q))^2.$$

Визначивши часткові похідні по кожному невідомому коефіцієнту a_j одержимо систему лінійних рівнянь, а розв'язавши її, знаходимо чисельні значення показників степенів a_1, a_2, a_3та a_4, з якими вони входять в структуру математичної моделі.

Значення V_q, s_q, t_q, τ_q,, а також величина зносу H_qє параметрами експериментальних досліджень. В таблиці 3.1 наведено результати дослідження зносу різального інструменту по задній грані при токарній обробці легованої сталі 40Х13прохідним різцем з пластинкою з твердого сплаву ВК8.

Таблиця 3.1 **Результати дослідження величини зносу різального інструменту при токарній обробці сталі 40Х13 прохідним різцем з твердого сплаву ВК8**

Оброблюваний матеріал		**Геометрія інструменту**						
твердість *HB* = 2170, границя міцності під час розтягування R_m = 981 Мпа		**головний кут різця в плані $\varphi = 45^0$, допоміжний кут в плані $\varphi_1=45^0$, передній кут $\alpha= 10^0$,задній кут $\gamma=2^0$, радіус при вершині різця r = 0,2 мм**						
Параметр виміру	Од. вим.	Номер досліду						
		1	2	3	4	5	6	7
Діаметр D_q	мм	65	65	64	63,5	63	62	61
Частота обертання n_q	об/ хв.	500	500	500	630	630	500	400
Подача s_q	мм/ хв	45	45	70	55	70	55	45
Глибина різання t_q	мм	0,5	0,5	0,25	0,25	0.5	0,5	0,25
Час різання τ_q	хв	0,1	2,71	4,47	6,68	8,45	10,6	13,27
Знос по задній поверхні різця H_q	мм	0,001	0,05	0,09	0,21	0,27	0,28	0,33

Обробка наведених експериментальних даних дозволила отримати таку залежність величини зносу різця по задній грані від режимів різання:

$$H = 3.7 \cdot 10^{-9} * V^{3.78} * s^{-0.9269} * t^{-1.45779} * \tau^{0.08718}, \text{ мм.}$$

В результаті аналізу можливостей використання чисельних методів для моделювання технологічних параметрів можна зробити наступні висновки:

1. Використання інтерполяційних формул для моделювання технологічних параметрів доцільно тільки в одновимірному просторі, тобто для отримання одновимірних математичних моделей, а також для спрощення обчислення складних математичних виразів шляхом представлення їх в вигляді степеневих поліномів та вирахування їх згідно схеми Горнера. При цьому добрі результати дає застосування кусочно-поліноміальної інтерполяції з використанням сплайн-функцій.

2. Апроксимацію функцій, наприклад, згідно методу найменших квадратів, можна використовувати для отримання математичних моделей як для безпосереднього моделювання, так і в складі складних алгоритмів обчислення. При цьому вигляд отриманих математичних моделей апріорно повинен бути відомим. Отже, апроксимація доцільна при розв’язанні задач ідентифікації математичних моделей.

3. Чисельні методи математичного моделювання дають добрі результати при розв’язанні задач отримання математичних моделей технологічних параметрів як самостійно, так і в складі складних алгоритмів.

3.3. Експериментально-статистичні методи побудови математичних моделей

В багатьох випадках аналітично одержати математичні моделі (3.7) не завжди представляється можливим або їх отримання пов’язано зі значними труднощами. Тому все більшу роль при ідентифікації статичних характеристик об'єктів відіграють експериментальні методи, основані на математичній статистиці, що застосовна для аналізу даних експерименту в тих випадках, коли

його результати можуть розглядатися як випадкові величини або процеси [8, 41].

3.3.1. Планування експериментів

Часто приступаючи до отримання математичної моделі технолог не має достатніх відомостей про механізм процесу, що досліджується. Він тільки може назвати параметри, що визначають умови протікання процесу та вимоги до результатів дослідження. В цих умовах доцільно використати кібернетичний метод, в основі якого лежить пропонована Н. Вінером ідея „чорної скриньки”. На вхід „чорної скриньки” як об’єкта дослідження поступають вхідні параметри, які можуть бути як керованими (вектор *X*) так і некерованими (вектор *Z*) та вектор, що не спостерігається (вектор *V*). Робота об’єкту характеризується декількома вихідними параметрами (вектор *Y*). Залежність між будь-яким вихідним параметром і вхідними параметрами (факторами) є функцією відклику і має такий вигляд:

$$y_i = f(x_1, x_2, ...x_n), i = 1,2,...n \tag{3.8}$$

де y_i – *i*-тий вихідний параметр (результат експерименту);

x_1, x_2, …, x_n – незалежні змінні (фактори), якими можливо варіювати при постановці експерименту.

Рівнянню (3.8) відповідає деяка гіперповерхня в багатовимірному просторі, що є поверхнею відклику, а простір, в якому існує вказана поверхня – факторним простором.

При досить обмежених знаннях про механізм процесу аналітичний вираз функції відклику невідомий. Тому приходиться обмежитись представленням її поліномом:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1,\\ i \neq j}}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k} b_{ij} x_i^2 + ..., \tag{3.9}$$

де b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}– коефіцієнти залежності, які можливо одержати методами регресійного аналізу, використовуючи результати експерименту. Отримане емпіричним шляхом рівняння буде математичною моделлю досліджуваного процесу. Ця модель не абсолютно точно описує процес, а є наближеним виразом невідомого закону, який задовільно характеризує процес в деякій локальній області факторного простору. Виходячи з цього, для наближеного опису одного і того ж явища може бути запропоновано декілька різних моделей. Відносно моделі правомірно використання таких визначень, як добра, погана та краща. Правда в цих випадках необхідно вказувати, за допомогою якого критерію виконана оцінка якості моделі.

В наслідок того, що вигляд та степінь поліному попередньо завбачити неможливо, то використовують покроковий пошук, тобто спочатку описують досліджуване явище найпростішою лінійною моделлю. Якщо оцінка якості моделі буде не задовільною, то збільшують кількість членів поліному, збільшуючи його степінь. Цей процес продовжують до того часу, поки не буде одержана модель, що адекватно описує досліджуване явище.

Якщо об'єкт дослідження з технічних, технологічних й економічних міркувань не допускає навмисного варіювання вхідних змінних у необхідному діапазоні, то для нагромадження статистичного матеріалу застосовується пасивний експеримент для одержання статичної моделі у вигляді рівняння регресії (2.9), що полягає в спостереженні й реєстрації значень вхідних і вихідних змінних у режимі нормального функціонування досліджуваного об'єкта. Використання пасивного експерименту для одержання математичного опису дозволяє уникати втручання в хід досліджуваного процесу. Але це значно збільшує час проведення експерименту. Крім того, іноді отримані моделі не несуть корисної інформації про процес тільки тому, що був занадто вузький інтервал зміни змінних, коли спостереження здійснювались фактично в одній точці, а незалежні змінні вимірювалися з великими похибками. Незважаючи на недоліки пасивного експерименту, він у багатьох випадках буває незамінним, але вимагає більш ретельної постановки експерименту й

застосовується для дослідження об'єктів менш упорядкованих з погляду стабілізації вхідних змінних.

Застосування методів планування активного експерименту припускає проведення дослідів у заданих дослідником умовах в області можливих значень факторів. Активний підхід до експерименту в сполученні з методами цілеспрямованого планування дозволяють одержувати максимум інформації при заданому обсязі експерименту.

В наслідок того, що найчастіше дослідник не має достатньої інформації про вигляд моделі, то на попередній стадії дослідження об'єкта зазвичай вибирають поліном першого ступеня, припускаючи, що параметри об'єкта лежать в області, у якій розташована досліджувана функція, і об'єкт описується лінійною моделлю. Якщо ж ця лінійна модель виявляється неадекватною, то в неї включають члени парної взаємодії x_{jv}, а при необхідності збільшують ступінь полінома доти, поки модель не буде адекватно описувати досліджуваний процес . У більшості практичних випадків квадратична модель виявляється придатною для опису процесу. В результаті обробки отриманих результатів експерименту визначаються оцінки коефіцієнтів рівняння регресії $\hat{\beta}_j, \hat{\beta}_{jv}, \hat{\beta}_{jj}$.

Розроблено алгоритм проведення експериментів та обробки їх результатів для одержання математичних моделей. Згідно з тим алгоритмом експеримент та обробка його результатів проводиться в декілька етапів. Кількість етапів та дії на кожному із них залежить від результатів попереднього етапу.

Лінійну математичну модель

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + ... + b_k x_k$$

можливо одержати за допомогою повного факторного експерименту (ПФЕ), при реалізації якого визначається значення вихідного параметру при всіх можливих комбінаціях рівнів варійованих факторів. Якщо ми маємо k –

факторів, кожен з яких може виставлятись на q – рівнях, то для реалізації ПФЕ вимагається поставити $n = q^k$ дослідів.

Найбільше поширення одержали експерименти, в яких фактори варіюють на двох рівнях, тобто експерименти типу 2^k. Менш популярні експерименти типу 3^k, де варіювання реалізуються на трьох рівнях. Але зі збільшенням кількості рівнів, кількість дослідів різко збільшується.

Обробка результатів експериментальних досліджень з метою отримання коефіцієнтів математичної моделі та визначення її адекватності здійснюється згідно методики регресійного аналізу. Ортогональність, симетрія, нормування та рототабельність планів проведення експериментів значно спрощує визначення коефіцієнтів моделі. Якщо отримана математична модель не описує адекватно досліджуваний процес, потрібні неформальні дії дослідника для одержання адекватної моделі. Для цього можна змінити шкалу вихідної величини y, або збільшити степінь поліному за допомогою ортогональних поліномів Чебишева та з використанням плану третього порядку. Можливо також провести новий експеримент, скоротити діапазони варіювання факторів, тобто зменшити область допустимих значень вхідних параметрів x_i, i= 1,2,…,k.

Планування експерименту та обробка його результатів методами регресійного аналізу для одержання математичної моделі можливо використовувати в таких випадках:

– процес являється керованим;

– процес є відтворюваним;

– фактори X незалежні функціонально та статистично;

– набори значень факторів повинні бути сумісні у всій області експерименту.

Крім того, цей спосіб одержання моделі доцільно використовувати при відносно малій (не більше 5) кількості факторів, малих трудовитратах та собівартості проведення експериментальних досліджень.

3.3.2. Регресійний аналіз

Для ідентифікації статичних характеристик об'єктів, а також для обробки результатів планових експериментів, застосовується регресійний аналіз, що дозволяє на основі статистичного матеріалу кількісно оцінити зв'язок між вхідними змінними $\bar{x}\{x_1,...x_k\}$ й вихідною змінною $y_i\left(i=\overline{1,m}\right)$. Надалі будемо вважати, що об'єкт дослідження або однорідний або вихідні змінні незалежні одна від одної [8, 13, 22].

При використанні методу регресійного аналізу повинні виконуватися такі умови:

1. результати спостережень $y_1,...,y_N$ вихідної величини y в точках досліджуваного простору вхідних змінних повинні бути незалежними випадковими величинами та розподілені за нормальним законом, а процес зміни y повинен бути стаціонарним у часі;

2. дисперсії $D_{yl}\left(l=\overline{1,N}\right)$ цих випадкових величин повинні бути однаковими (вибіркові дисперсії $s_l^{\,2}$ однорідні); всі значення вхідних величин $x_j\left(j=\overline{1,k}\right)$ повинні вимірюватися з відносно малою похибкою в порівнянні з похибкою вимірювання вихідної величини y;

3. вхідні змінні $x_j\left(j=\overline{1,k}\right)$ не повинні бути корельовані між собою; всі сусідні виміри по кожній *j*-й вхідній величині повинні бути незалежні.

Побудова моделі істотно спрощується, якщо в якості її складових використовуються поліноми, які варто включати в рівняння регресії. Моделі поліноміального виду мають перевагу в зв'язку з тим, що з їхньою допомогою аналітична функція (3.8) може бути описана досить точно. Як відомо, будь-яку функцію, якщо вона не має нескінченних розривів, можна розкласти в степеневий ряд Тейлора. Тому математичний опис (3.8) представимо у вигляді полінома розкладання в ряд Тейлора:

$$y=f\left(x_1,\ldots,x_n\right)=b_0+\sum_{j=1}^{n}b_jx_j+\sum_{i,j=1}^{n}b_{ij}x_ix_j+\sum_{j=1}^{n}b_{jj}x_j^2\ldots, \qquad (3.10)$$

де b_0, b_j, b_{ij}, b_{jj} – постійні коефіцієнти рівняння, оцінки яких необхідно визначити в результаті постановки й проведення експерименту;

n– кількість найбільш істотних вхідних змінних, отриманих у результаті відсіючого експерименту.

Розроблено алгоритм регресійного аналізу експериментальної інформації, схема якого наведена на рис. 3.2 та виконано його програмну реалізацію. Як приклад використання регресійного аналізу покажемо моделювання вихідних параметрів вакуум-плазмових покриттів, а саме швидкості ізотермічної та термоциклічної повзучості здійснювалось на основі використання кібернетичного методу "чорної скриньки". Згідно з цим методом на вхід досліджуваного об'єкту подавались різноманітні значення вхідних (регульованих) параметрів, а саме: X_1 – вид покриття; X_2 – товщина покриття; X_3– час попередньої іонної обробки; X_4– тиск реакційного газу; X_5– температура. На процес нанесення покриттів впливають також неконтрольовані випадкові параметри $Z=(z_1, z_2, \ldots, z_n)$, які визначають ймовірний характер результатів досліджень, а саме – значень вихідних величин (Y_1– швидкості ізотермічної повзучості; Y_2– швидкості термоциклічної повзучості).

Використовуючи результати експертних оцінок та вибіркових дослідів, встановлені інтервали варіювання вхідних величин (факторів) X_1 ... X_5для проведення експериментальних досліджень.

Згідно з вказаними інтервалами варіювання здійснено 16 дослідів при різних значеннях вхідних параметрів.

В результаті проведення експериментальних досліджень при різноманітних значеннях технологічних, конструктивних та експлуатаційних параметрів (вхідних факторів) визначені значення швидкостей ізотермічної та термоциклічної повзучості покриттів. Причому, для підвищення якості одержуваних математичних моделей досліди при кожному наборі значень факторів дублювались.

Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалась методами багатовимірного регресійного аналізу.

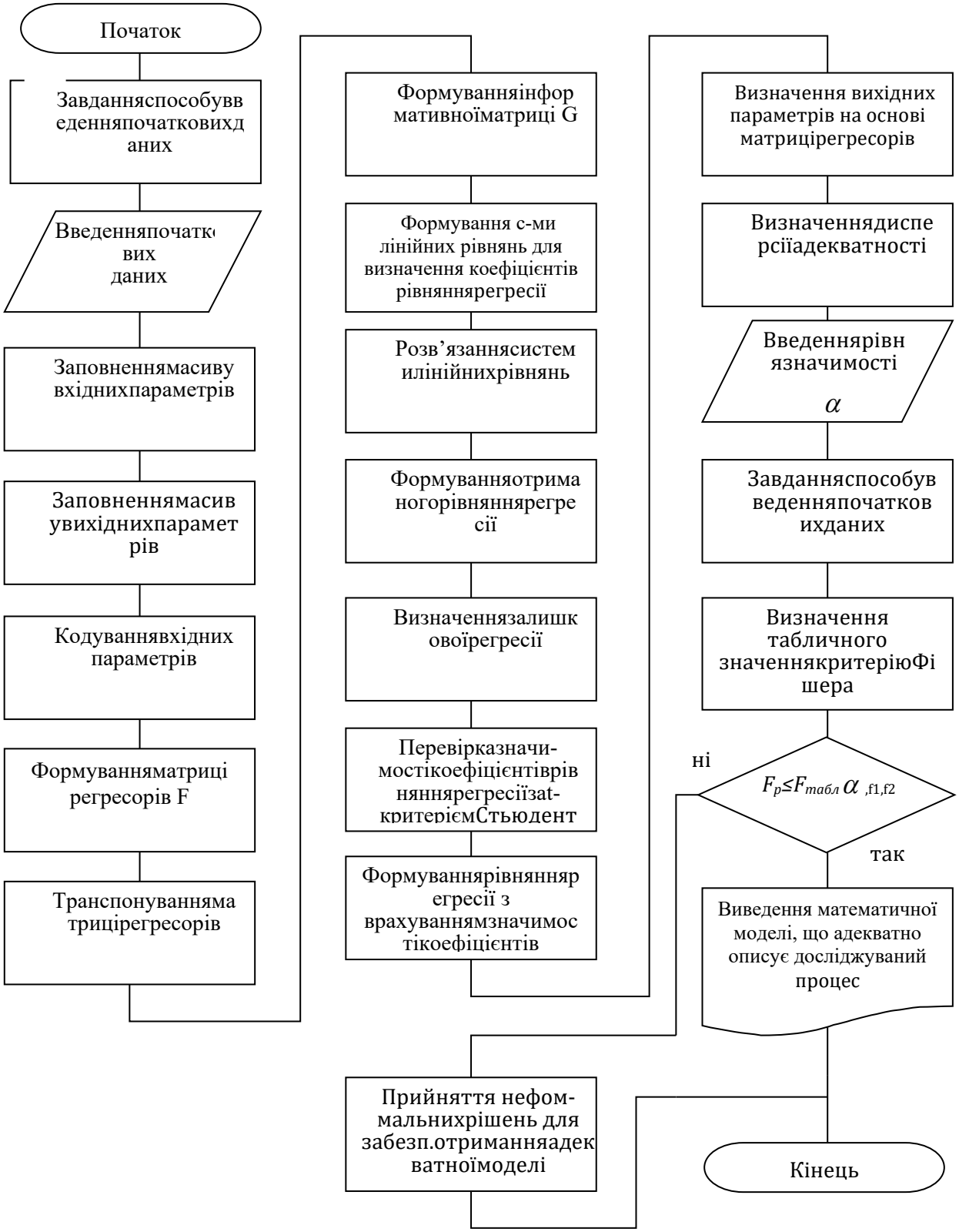


Рис. 3.2. Алгоритм методу регресійного аналізу даних.

Таким чином одержані адекватні (з довірчою ймовірністю 0,9) математичні моделі вихідних показників процесу нанесення покриттів – швидкості ізотермічної повзучості ε_u та швидкості термоциклічної повзучості ε_m, що мають такий вигляд:

$Y_1 = (2.6597 + 0.44878x_1 + 0.35685x_2 - 0.39622x_3 - 0.83013x_4 + 2.993x_5 + 0.030247x_1x_2 - 0.03361x_1x_3 - 0.0704258x_1x_4 + 0.25392x_1x_5 - 0.02662x_2x_3 - 0.055768x_2x_4 + 0.20107x_2x_5 + 0.06192x_3x_4 - 0.223326x_3x_5 - 0.4677458x_4x5 + 0.019116x_1^2 + 0.0119865x_2^2 + 0.014778x_3^2 + 0.064866x_4^2 + 0.84323x_5^2)^2;$

$Y_2 = (2.0982 + 0.9264x_1 + 0.129x_2 + 0.0905x_3 - 0.86385x_4 + 2.08544x_5 + 0.02851x_1x_2 + 0.019971x_1x_3 - 0.19071x_1x_4 + 0.4604x_1x_5 + 0.0265796x_2x_4 + 0.064166x_2x_5 - 0.0186244x_3x_4 + 0.0449626x_3x_5 - 0.429297x_4x5 + 0.1022646x_1^2 + 0.0889134x_4^2 + 0.518189x_5^2)^2,$

де x_1, x_2, x_3, x_4, x_5– кодові значення вхідних регульованих параметрів.

Наведений приклад використання регресійного аналізу для отримання моделей складних процесів показав його ефективність та доцільність застосування при розв'язанні задач моделювання технологічних параметрів. Перевагою застосування регресійного аналізу для моделювання технологічних параметрів є можливість використання виробничої статистичної інформації та інформації, що отримана в результаті проведення експериментів при довільних рівнях вхідних параметрів.

3.4. Моделювання параметрів з використанням методів теорії подібності та аналізу розмірностей

Неосяжна інформація про вивчення явищ методами моделювання має бути упорядкована. Це здійснюється за допомогою теорії подібностей, яка дозволяє по заданим характеристикам одного явища зробити висновки про великі групи явищ, які в тим або іншим подібні до першого явища. Подібність явищ означає, що дані про протікання процесу можна поширити на всі явища, подібні даному. При цьому треба враховувати, що модель не дає і не повинна давати подібності всіх процесів, що містять в собі явище або пов'язані з ним. Модель забезпечує подібність тих процесів, які задовольняють критеріям подібності, що знайдені на основі теорії подібності [8, 40].

Теорія подібності використовується: при аналітичному пошуку залежностей, співвідношень та рішень конкретних задач; при обробці результатів експериментальних досліджень, якщо результати представлені у вигляді узагальнюючих залежностей; при створенні моделей, тобто установок, що відтворюють явища в інших установках.

Теорія подібності базується на трьох теоремах, що встановлюють зв'язки між величинами, які характеризують природу процесів. Згідно першій теоремі, необхідною умовою подібності двох систем являється рівність відповідних критеріїв подібності, що складені з параметрів процесу та параметрів систем.

Друга теорема, відома під назвою π–теореми, говорить, що всяке повне рівняння фізичного процесу, яке записане в визначеній системі одиниць. Воно може бути представлене залежністю між критеріями подібності, тобто рівняння, що зв'язує безрозмірні величини. При цьому критерії одержані з параметрів, що приймають участь в процесі

$$\pi_1=\Phi(\pi_2, \pi_3 \ldots \pi_{m-k}),$$

де π_i – критерії подібності;

m – кількість параметрів, які характеризують об'єкт дослідження;

k – кількість незалежних одиниць, через які будуть виражатися інші параметри.

Третя теорема формулює умови необхідності та достатності для практичної реалізації подібності. Вона стверджує, що для подібності явищ повинні бути відповідно однаковими визначаючі критерії подібності та подібні умови однозначності.

Як відомо, процес металообробки характеризується значною кількістю факторів, що на нього впливають. Якщо всі фактори включити в експеримент, то при цьому значно ускладнюється дослідження процесу різання. Зменшити число варійованих факторів, особливо при проведенні планового експерименту можна використовуючи метод аналізу розмірностей. Для правильного використання цього методу треба мати повний перелік фундаментальних

змінних, які суттєво впливають на експеримент і мають можливість самостійно змінюватись. Тоді можна зменшити кількість факторів. Використовуючи першу частину теореми Букінгема і якщо які-небудь рівняння однорідні відносно розмірностей, то його можна перетворити до співвідношення, що містить в собі розмірні комбінації величин. Однорідним відносно розмірностей є рівняння, форма якого не залежить від вибору основних одиниць виміру.

Безрозмірними комбінаціями в теоремі вважають добуток або відношення (дроби) величин, складені таким чином, що в кожній комбінації розмірності скорочуються. В результаті переходу до безрозмірних комбінацій величин експеримент значно спрощується, тому що варіювання буде виконуватись не окремими змінними, а комбінаціями.

Для одержання залежностей, що містять безрозмірні комбінації, використовують метод Релея. Згідно з цим методом приводять початкову систему до деякої системи основних одиниць (наприклад, до системи, що включає три основі одиниці : масу M, довжину L, час T).

Підставляючи співвідношення форми розмірностей в основне рівняння та розв'язавши його відносно невідомих показників степенів, одержимо безрозмірні комбінації.

Математична перевірка результатів аналізу розмірностей виконується по другій частині теореми Букінгема, якщо існують однозначні співвідношення виду

$$F(P_1, P_2, \ldots, P_m) = 0 \qquad (3.11)$$

між m-фізичними величинами, для опису яких використовуються k незалежних параметрів, то існує також співвідношення виду

$$\Phi(\pi_2, \pi_3, \ldots, \pi_{m-k}) = 0 \qquad (3.12)$$

між (m-k) безрозмірними комбінаціями, що складані з цих величин.

Теорема Букінгема дозволяє визначити тільки кількість безрозмірних комбінацій величин. Але теорема не забороняє більшої кількості комбінацій.

Рівняння (3.11) повне, а звідси і однорідне, тому всі параметри, що входять в нього, можна виразити в відносних одиницях, тобто в долях деяких вибраних величин, які мають відповідно ту ж розмірність:

$$F(\frac{P_1}{P_{01}}, \frac{P_2}{P_{02}}, \dots, \frac{P_i}{P_{0i}}, \dots \frac{P_k}{P_{0k}}, \frac{P_{k+1}}{P_{0k+1}}, \dots, \frac{P_s}{P_{0s}}, \dots, \frac{P_m}{P_{0m}}) = 0. \qquad (3.13)$$

Однак не всі величини можна вибрати довільно. Можна встановити, яка кількість незалежних величин $P_{01},...,P_{0k}$вибирається із загальної множини величин $P_{01},...,P_{0m}$, і визначити спосіб їх вибору, розглянувши формули розмірностей всіх величин, що входять в співвідношення (3.13).

Кожну величину, що входить в рівняння (3.12) можна представити в вигляді добутку її числового значення $\{P\}$на одиницю виміру даної величини $[p]$

$$P = \{P\}[p]$$

Нехай в вибраній системі одиниць маємо $k = q$ основних одиниць виміру. Позначивши їх через a, b, c, …, q, запишемо вирази одиниць виміру всіх величин, що приймають участь, тобто їх формули розмірностей:

$$[p_1]=[a^{\alpha 1}\ b^{\beta 1}\ \dots\ q^{\varepsilon 1}\ ]=[p_{01}];$$
$$[p_2]=[a^{\alpha 2}\ b^{\beta 2}\ \dots\ q^{\varepsilon 2}]=[p_{02}];$$
$$\dots$$
$$[p_i]=[a^{\alpha i}\ b^{\beta i}\ \dots\ q^{\varepsilon i}\ ]=[p_{0i}];$$
$$\dots$$
$$[p_k]=[a^{\alpha k}\ b^{\beta k}\ \dots\ q^{\varepsilon k}]=[p_{0k}]; \qquad (3,14)$$
$$\dots$$
$$[p_s]=[a^{\alpha s}\ b^{\beta s}\ \dots\ q^{\varepsilon s}]=[p_{0s}];$$
$$\dots$$
$$[p_m]=[a^{\alpha m}\ b^{\beta m}\ \dots\ q^{\varepsilon m}\ ]=[p_{0m}],$$

де α,β … ε – деякі числа.

Зроблене раніш припущення, що одиниці виміру $[p_{01}]$ ... $[p_{0m}]$ незалежні, означає, що формула розмірностей будь–якої з цих одиниць не може бути представлена як комбінація (що отримана шляхом множення або ділення) із формул розмірностей інших незалежних одиниць. При цьому для незалежності треба мати нерівність нулю хоч одного визначника D, що складений із показників степенів основних (1, 2,..., k) одиниць, що входять в (3,14). Порядок визначника не перевищує кількості основних одиниць (в нашому випадку q)

Тому що k одиниць виміру величин P_0 є незалежними, то інші $m–k$ одиниць і відповідно величин $[P_0]$ будуть їх функціями, тобто

$$
\begin{gathered}
[P_{0k+1}]=\psi_{k+1}([p_{01}], [p_{02}], \ldots, [p_{0i}], \ldots,[p_{0k}]); \\
\ldots \\
[P_{0s}]=\psi_s([p_{01}], [p_{02}], \ldots, [p_{0i}] \ldots,[p_{0k}]) \quad ; \qquad (3.15) \\
\ldots \\
[P_{0m}]=\psi_m([p_{01}], [p_{02}], \ldots, [p_{0i}], \ldots,[p_{0k}];
\end{gathered}
$$

Покажемо, що це дійсно так. Для цього прологарифмуємо перші k рівнянь в (3.14), в результаті цього одержимо систему k лінійних рівнянь зі сталими коефіцієнтами:

$$
\begin{gathered}
ln[P_{01}] = \alpha_1 ln[a] + \beta_1 ln[b] + .. + \varepsilon_1 ln[q]; \\
ln[P_{02}] = \alpha_2 ln[a] + \beta_2 ln[b] + .. + \varepsilon_2 ln[q]; \\
\ldots \\
ln[P_{0i}] = \alpha_i ln[a] + \beta_i ln[b] + .. + \varepsilon_i ln[q]; \qquad (3.16) \\
\ldots \\
ln[P_{0k}] = \alpha_k ln[a] + \beta_k ln[b] + .. + \varepsilon_k ln[q];
\end{gathered}
$$

Розв’язавши цю систему відносно $[a]$, $[b]$,…,$[q]$, отримаємо:

$$[a]=[P_{01}]^{A_{11}/D}[P_{02}]^{A_{21}/D} \ldots [P_{0i}]^{A_{i1}/D}[P_{0k}]^{A_{k1}/D}$$

$$[b]=[P_{01}]^{A_{12}/D}[P_{02}]^{A_{22}/D} \ldots [P_{0i}]^{A_{i2}/D}[P_{0k}]^{A_{k2}/D}$$

$$\ldots \qquad (3.17)$$

$$[q]=[P_{01}]^{A_{1k}/D}[P_{02}]^{A_{2k}/D}\ \ldots\ [P_{0i}]^{A_{ik}/D}[P_{0k}]^{A_{kk}/D}.$$

Тут

$$D = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \ldots & \varepsilon_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \ldots & \varepsilon_2 \\ \alpha_i & \beta_i & \ldots & \varepsilon_i \\ \alpha_k & \beta_k & \ldots & \varepsilon_k \end{vmatrix} \qquad (3.18)$$

– визначник *k*-го порядку, що складений з коефіцієнтів системи (3.16);

$A_{11}, A_{21}, \ldots, A_{к1}, A_{21}, A_{22}, \ldots, A_{к2}, \ldots, A_{1к}, A_{2к}, \ldots, A_{кк}$ – показники елементів визначника *D* (перший індекс відповідає номеру рядка, другий – номеру стовпчика).

Підставивши вираз (3.17) в інші *m-k* рівнянь системи (3.14) від (*k+1*) –го до *m*–го, одержимо (*m-k*) виразів для величин, що приймають участь в процесі та які представлені через довільно вибрані величини $P_{01}\ P_{02}\ \ldots\ P_{0к.}$ Так, наприклад для $P_{0к+1}$ будемо мати

$$[P_{0к+1}]=[P_{01}{}^{\alpha k+1}]^{A_{11}/D}\ldots\ [P_{0k}{}^{\alpha k+1}]^{A_{k1}/D}\ [P_{01}{}^{\beta k+1}]^{A_{k2}/D}\ldots$$

$$\ldots[P_{0k}{}^{\beta k+1}]^{A_{k2}/D}\ldots\ [P_{01}{}^{\varepsilon k+1}]^{A_{k1}/D}\ldots[P_{0k}{}^{\varepsilon k+1}]^{A_{kk}/D} \qquad (3.19)$$

Для будь-якої величини від $P_{0к+1}$до P_{0m}, тобто для P_{0S}, де $s=k+1, к+2,\ldots,m$ можна записати відповідні вирази. Після групування в правих частинах величин з однаковими індексами при основі отримаємо :

$$[P_{01}]=[P_{01}]^{D_{1S}/D}[P_{02}]^{D_{2S}/D}\ldots\ [P_{0i}]^{D_{IS}/D}\ldots\ [P_{0к}]^{D_{kS}/D} \qquad (3.20)$$

тоді для P_{0s}маємо

$$\alpha_s{}' = D_{IS}/D,\ \gamma'_s = D_{IS}/D;\ \varepsilon'_s = D_{IS}/D \qquad (3.21)$$

Значення величин D_{ij}, де $j=1,2,\ldots,k,\ s=k+1,\ldots,m$ вираховують із визначника (3.18) після заміни в ньому *j*–го рядка на рядок, що складений з показників степені $\alpha_s{}', \beta'_s, \varepsilon'_s$ величин $[P_{0s}]$, $s=r+1,\ldots,m$.

Якщо серед m величин P_{01}, P_{02}, P_{0k}маємо k незалежних(P_{01}, P_{02}, P_{0k}), що вибираються довільно, то інші m-k величин ($P_{0к+1}, P_{0к+2}, ...,P_{0s, ...,}P_{0m}$) є добутками незалежних величин в вибраних степенях $\alpha_s^{'}, \gamma_s^{'}, ..., \varepsilon_s^{'}$, де $s=k+1, k+2, \dots, m$.

З врахуванням (3.15) можна переписати (3.13) у вигляді:

$$F(\frac{p_0}{P_{01}} ,\dots, \frac{p_i}{P_{0i}},.., \frac{p_k}{P_{0k}}, \frac{p_{k+1}}{p_{01}^{\alpha k+1'} p_{02}^{\beta k+1'} ... p_{ok}^{\varepsilon k+1'}},..., \frac{p_s}{p_{01}^{\alpha s'} p_{02}^{\beta s'} ... p_{0k}^{\varepsilon s'}},..., \frac{p_m}{p_{01}^{\alpha m'} p_{02}^{\beta m'} p_{0k}^{\varepsilon m'}})=0 \quad (3.22)$$

Вважаючи, що k незалежних величин P_0 вибираються довільно, то можна прийняти що

$$P_{01}=P_1 , P_{02}= P_2, P_{0k} = P_k.$$

Тоді (3.13) приймає вигляд, що відповідає формулюванню другої теореми подібності:

$$F_1=(1,1,\dots,1,\pi_1, \pi_{s-k}, \pi_{m-k})=0 \ , \quad (3.23)$$

де значення $\pi_1, \pi_{s-k}, \pi_{m-k}$ – критерії подібності.

$$\pi_1 = \frac{p_{k+1}}{p_1^{\alpha k+1'} p_2^{\beta k+1'} ... p_k^{\varepsilon k+1'}}, \ \pi_{s-k} = \frac{p_s}{p_1^{\alpha s'} p_2^{\beta s'} ... p_k^{\varepsilon s'}}, \ \pi_{m-k} = \frac{p_m}{p_1^{\alpha m'} p_2^{\beta m'} p_k^{\varepsilon m'}} \quad (3.24)$$

Величини $\alpha', \beta', \varepsilon'$ показують, який показник степені (критеріальний показник) має та або інша величина, що входить в критерій подібності.

Одиниці виміру чисельників та знаменників у всіх критеріях одинакові, тому що

$$\pi=[\frac{p_s}{p_1^{\alpha s'} p_2^{\beta s'} ... p_k^{\varepsilon s'}}]=1$$

або

$$[P_s]=[P_1]^{\alpha s'} [P_2]^{\beta s'} \dots [P_k]^{\varepsilon s'} \quad (3.25)$$

Підставляючи в (2.25) основні одиниці виміру, отримаємо

$$a^{\alpha s} \ b^{\beta s} \ ... \ q^{\varepsilon s} = (a^{\alpha 1} \ b^{\beta 1} \ ... \ q^{\varepsilon 1})^{\alpha s'} \ ... \ (a^{\alpha 2} \ b^{\beta 2} \ ... \ q^{\varepsilon 2})^{\beta s'} \ ...$$

$$(a^{\alpha k}\ b^{\beta k}\ \dots\ q^{\varepsilon k})^{\varepsilon s'} \qquad (3.26),$$

звідки виходить, що

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \alpha_1\alpha_s' + \alpha_2\beta'_s + \dots + \alpha_k\varepsilon'_s \\ \beta_s &= \beta_1\alpha_s' + \beta_2\beta'_s + \dots + \beta_k\varepsilon'_s \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_1\alpha_s' + \varepsilon_2\beta'_s + \dots + \varepsilon_k\varepsilon'_s \end{aligned} \qquad (3.27)$$

Одержані вище k співвідношень (3.27) визначають зв'язок між відомими показниками розмірностей основних одиниць виміру ($\alpha_1, \alpha_2,\dots,\alpha_s$) та шуканими критеріальними показниками (α',...,ε'), а також дозволяють знайти їх числові значення.

Таким чином, є можливість математичного відображення фізичного процесу *m-k* безрозмірними співвідношеннями – критеріями подібності. Будь-яке рівняння, що дає зв'язок між *m*-величинами і представлене в критеріальній формі (3.23) та розв'язане відносно критерію подібності, дозволяє виразити його як функцію *m–k*–1 критеріїв подібності:

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{m-k})$$

В відповідності з наведеними теоремами критерії відповідності визначаються в основному двома способами.

Перший спосіб полягає в приведенні математичної моделі фізичного процесу до безрозмірного вигляду. Для того, щоб використовувати цей спосіб, треба мати рівняння процесу, що моделюється.

Другий спосіб базується на використанні π-критеріїв. Цим способом можна користуватись також в випадках, коли відомі тільки параметри, що приймають участь в досліджуваному процесі, а рівняння процесу невідомі.

На практиці використовується також третій спосіб визначення відносних одиниць, який є модифікацією перших двох способів. При цьому всі параметри виражаються в долях від базисних величин, вибраних визначеним методом. Найбільш суттєві параметри, що виражають в долях від базисних, можна розглядати як свого роду подібності, що діють в даних конкретних умовах.

Для математичного моделювання процесу різання найбільш доцільно використовувати другий спосіб визначення критеріїв подібності, тому що відомі тільки параметри процесу, а вигляд рівнянь невідомий.

Розроблена схема алгоритму визначення π-критеріїв. Відповідно до цього алгоритму необхідно: визначити m параметрів P_1, P_2, P_3,..., P_i, ..., P_m, які характеризують досліджуваний процес, скласти матрицю розмірностей m, використовуючи n основних фізичних одиниць виміру; вибрати $к$ незалежних між собою параметрів; скласти матрицю розмірностей з $к$ незалежних параметрів та вирахувати її визначник D; перевірити правильність вибору незалежних параметрів. Якщо $D = 0$, то вибрані k параметрів є залежними і треба повторити вибір параметрів; при $D \neq 0$ досліджуваний процес представляється в критеріальній формі.

Знаходження критеріїв подібності полягає в визначенні форми запису рівнянь та в пошуку значень показників степенів. Визначити показники степенів можна двома способами. За першим способом визначення треба знайти визначники D_{ij} згідно з формулами (3.21) . В простих випадках більш зручним є другий спосіб, який не потребує операцій з визначниками. Виражаючи всі величини, що входять до критеріїв подібності, через основні границі виміру та виходячи від (3.24) до (3.27) знайдемо досить прості рівняння для показників степенів розмірностей і складання виразів m-k критеріїв подібності у всіх формах запису.

В якості прикладу наведено отримання математичної моделі, що визначає період стійкості різального інструменту від величини зносу h різального інструменту по задній крайці, твердості інструментального H_u та оброблюваного H_g матеріалів, температури θ в зоні різання, швидкості різання V, амплітуди та частоти коливань A, f, а саме

$$T = \varphi(h, H_u, H_g, \theta, V, A, f) \tag{3.28}$$

Ця залежність шляхом застосування методів теорії подібності та аналізу розмірностей перетворена до вигляду

$$\pi_1 = \Phi\,(\pi_2, \pi_3, \pi_4), \qquad (3.29)$$

де $\pi_1=(VT)/h$– критерій подібності, що характеризує відносний шлях різання, тобто величину шляху, пройденого різальним інструментом за одиницю його зносу;

$\pi_2=H_u(\theta)/H_g(\theta)$– критерій подібності, що характеризує формостійкість леза різального інструмента;

$\pi_3=(fh)/V$ – критерій подібності, що визначає частотно-швидкісний режим обробки;

$\pi_4=A/h$– критерій подібності, що характеризує відносну амплітуду коливань.

В результаті використання регресійного аналізу отримана математична модель процесу в критеріальній формі, що має такий вигляд:

$$\ln\frac{TV}{h} = 11{,}877265 + 0{,}2439123\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)} - 25{,}4475424\frac{fh}{V} + 4{,}0218524\frac{A}{h} -$$
$$- 0{,}0023003\left[\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)}\right]^2 - 0{,}19555191\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)}\cdot\frac{fh}{V} - 0{,}534068\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)}\cdot\frac{A}{h} + 242{,}0981\left(\frac{fh}{V}\right)^2 -$$
$$- 97{,}414781\frac{fA}{V} + 65{,}55484\left(\frac{A}{h}\right)^2.$$

Звідси період стійкості різального інструмента дорівнює:

$$T = \frac{h}{V}\exp(K_T),$$

$$K_T = 11{,}877265 + 0{,}2439123\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)} - 25{,}4475424\frac{fh}{V} + 4{,}0218524\frac{A}{h} -$$
$$- 0{,}0023003\left[\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)}\right]^2 - 0{,}19555191\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)}\cdot\frac{fh}{V} - 0{,}534068\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)}\cdot\frac{A}{h} + 242{,}0981\left(\frac{fh}{V}\right)^2 -$$
$$- 97{,}414781\frac{fA}{V} + 65{,}55484\left(\frac{A}{h}\right)^2.$$

Таким чином, використання методів теорії подібності та аналізу розмірностей дозволяє значно зменшити кількість параметрів, що застосовуються в математичних залежностях при розв’язанні задач технологічної підготовки

виробництва. А це, в свою чергу, знижує кількість експериментів, витрати оброблюваного та інструментального матеріалів а також зменшує час проведення експериментальних досліджень.

3.5. Фрактальний аналіз технологічної інформації

Використання в приладобудуванні нових матеріалів і сплавів зі складною структурою, особливо гетерогенною, зокрема наплавлених або напилених, а також потреба отримати поверхні обробленої деталі з високою точністю та шорсткістю потребує виконання розрахунків з використанням нових методів, в тому числі і фрактального аналізу.

Раніш вважалось, що геометрія в природі обмежується такими простими фігурами, як лінія, круг, конус, многокутник, сфера, квадратична поверхня, а також їх комбінаціями.

Проте багато природних систем настільки складні і нерегулярні, що використання тільки знайомих об'єктів класичної геометрії для їх моделювання представляється не завжди надійним.

Фрактали надають відповідні засоби для розв’язання поставлених задач. Термін фрактал відноситься до деякої статичної геометричної конфігурації. Нерідко те, що ми спостерігаємо в природі, інтригує нас нескінченною побудовою одного і того ж узору, збільшеного або зменшеного в скільки завгодно разів. Теоретично, елемент „розгалуження” повторюється нескінченно багато разів, стаючи все менше і менше. Так виявляється характерна для чинників властивість самоподібності.

Фрактальна розмірність. Існують дещо принципово різні визначення розмірності геометричного об'єкту, а саме: фрактальна розмірність, або розмірність Мінковського, топологічна розмірність і розмірність Хаусдорфа-Безиковича. Топологічна розмірність множини завжди виражається цілим числом; це не протирічить інтуїтивному уявленню про те, що криві одновимірні, а поверхні двовимірні. Розмірність Хаусдорфа-Безиковича лежить в основі фрактальної теорії. Мандельброт визначив фракталяк множину,

розмірність Хаусдорфа-Безиковича якого суворо більше топологічної розмірності. Розмірність Мінковського може бути аналогом розмірності Хаусдорфа- Безиковича і є зручною для використання в прикладних задачах. Ці розмірності, як правило, співпадають, але алгоритм визначення розмірності Мінковського набагато ефективніший.

Розмірність Мінковського. Розглянемо відомі вирази для довжини, площі і об'єму „кулі" в евклідовому просторі. Довжина „кулі" радіусу *r в R* рівна *2r*. Площа „кулі" радіусу *r* в R^2рівна πr^2. Нарешті, об'єм кулі радіусу *r* в R^3рівний $4/3\pi r^3$. Відповідні форми в евклідовому просторі будь-якого (цілого) числа вимірювань добре відомі.

$$V_d = \Gamma(x) r^d,\ d=1,2,3,\ldots \tag{3.30}$$

де $\Gamma(x)$ – Гамма-функція:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt, \qquad x > 0\,.$$

Це безперервна функція позитивного аргументу, яка інтерполює факторіал як:

$$\Gamma(n+1) = n!, \qquad n = 0,1,2,\ldots\,.$$

Перший крок в побудові теорії дробової розмірності полягає у визначенні *d*-мірикулі радіусу *r* вR^n, де *d* – будь-яке не від'ємне дійсне число. Це досягається розповсюдженням формули (3.30) на все дійсні *d > 0.* Наприклад, об'єм (міра) кулі в 3/2-вимірному просторі визначається як $V_{3/2} = \gamma(3/2) r^{3/2}$. Конкретне значення коефіцієнта $\gamma(d)$ не відіграє ніякої ролі в наших подальших міркуваннях і його можна вважати константою.

Наступний крок полягає в перенесенні поняття *d*-міри з кулі на довільну множину $A \subset R^n$. Для цього апроксимуємо *A* об'єднанням куль і підсумуємо їх об'єми.

Нехай $N(e)$ – мінімальна кількість куль радіусу e, необхідних для прикриття компактної множини A, тоді d-міра A, що визначається, задовольняє (приблизно):

$$B_d(A) \infty N(e)e^d .$$

Вважаючи, що, для деякого $c > 0$ маємо:

$$N(\varepsilon) = \frac{c}{\varepsilon^d} \tag{3.31}$$

Логарифмуючи ліву і праву частини, отримаємо (приблизно):

$$\log N(\varepsilon) = \log c - d \log d \tag{3.32}$$

тобто

$$d = -\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} + \frac{\log c}{\log \varepsilon}$$

Оскільки $\log \varepsilon \to \infty$, то розмірність Мінковського $\dim_M(A)$ множини A повинна задовольняти:

$$\dim_M(A) = d = -\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(\varepsilon)} \tag{3.33}$$

Якщо границя існує, то вираз (3.33) визначає розмірність Мінковського множини A. Інколи також використовують термін „дробова розмірність”.

Для обчислення розмірності Мінковського d зазвичай використовують співвідношення (3.32).

$$\log N(\varepsilon) = \log c - d \log d , \tag{3.34}$$

де c – константа.

Графік залежності $\log N(\varepsilon)$ від $\log \varepsilon$ є прямою з кутовим коефіцієнтом d. Нагадаємо, що через $N(\varepsilon)$ позначено мінімальну кількість клітинок із стороною

e, необхідних для покриття фрактала. Для визначення невідомих параметрів *c*і *d* треба оцінити $N(\varepsilon)$ для декількох значень *e.*

Якщо використовувати клітки тільки двох розмірів, e_1і e_2, то невідомі *c* і *d* можна визначити з системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \log N(\varepsilon_1) &= \log c - d \log \varepsilon_1 \\ \log N(\varepsilon_2) &= \log c - d \log \varepsilon_2 \end{aligned} \tag{3.35}$$

Проте, враховуючи, що величини $N(\varepsilon)$ можуть бути знайдені лише приблизно, є сенс оцінити $N(\varepsilon)$ для великої кількості різних значень *e*. В цьому випадку ми отримаємо перевизначену систему (кількість рівнянь більше кількості невідомих), яка, швидше за все, не матиме точного рішення. Стандартний прийом в подібній ситуації полягає в тому, щоб знайти значення $\log c$ і *d*, що мінімізують суму квадратів відхилень, наприклад методом найменших квадратів.

Крім того, використовується також клітинний метод. Цей простий спосіб визначення розмірності Мінковського фрак тала *A* полягає в наступному. Розбивається область, що містить *A*, на квадратні клітинки (двовимірний випадок) декількох розмірів. Потім підрахуємо кількість клітинок, необхідних для покриття *A* в кожному випадку, і підставимо набуті значення в співвідношенні (3.32). Очевидно, якщо фрактал *A* є підмножиною прямої, то замість квадратів треба використовувати відрізки. Якщо ж *A* – підмножина тривимірного простору, то квадрати замінюють кубами.

Наступний простий алгоритм обчислення розмірності на площині краще всього працює при порівняно великих розмірах вікна, 200×200 і більше. Його головний недолік полягає в тому, що підраховане значення $N(L)$ не є найменшою кількістю клітинок із стороною *L*, що покривають фрактал. Для досягнення кращих результатів алгоритм може бути вдосконалений.

Фрактальний аналіз знайшов широке використання при розробці нових матеріалів і сплавів, при вивченні структур матеріалів, особливо тих, що мають гетерогенну структуру тощо. В своїх роботах Клименко С.А. показав, що

процес обробки матеріалів різанням характеризується сукупністю взаємозв'язаних параметрів, що відображають різні явища, які відбуваються під час взаємодії різального інструменту з оброблюваною заготівкою. Традиційне поняття оброблюваності матеріалів різанням пов'язують з початковою його структурою і механічними властивостями матеріалів. В той же час оброблюваність матеріалів є масштабно залежною величиною, оскільки традиційно використовувані характеристики структури і механічних властивостей матеріалів залежать від масштабу їх оцінки.

Найкраще фрактальні особливості виявляються при сумісному врахуванні декількох характеристик матеріалу – структури, властивостей, геометричних параметрів тощо. Фрактальна структура пов'язана з нестандартними властивостями розподілу характеристик матеріалу в просторі, що полягають в залежності параметрів, які характеризують фрактальний агрегат розміру, від масштабу їх оцінки у вигляді

$$M = m_0 \cdot \left(d \diagup a \right)^n , \tag{3.36}$$

де M – оцінюваний параметр (маса, щільність і т. д.);

n – коефіцієнт, що залежить від величини фрактальної розмірності, яка має дробове значення і не співпадає з величиною топологічної розмірності.

Також Клименко С.А. розглядає вплив на процес обробки як механічних властивостей оброблюваного матеріалу, так і наявності на поверхні оброблюваної деталі макро- і мікронерівностей, що обумовлюють змінне навантаження на різальний інструмент.

Фрактальність структури і властивостей оброблюваного матеріалу надає безпосередній вплив на режими різання, закономірності процесу стружкоутворення, термосилові особливості процесу різання, зношування ріжучого інструменту, якість обробленої поверхні.

Загалом, глибина різання складається з двох складових – змінної (в межах дефектного нерівного шару) $t_{прм}$ і постійної (нижче за нерівний шар) $t_{пст}$.Це

особливо актуально в умовах чорнового проходу, коли із заготівки видаляється дефектний поверхневий шар. При чистовій обробці змінна складова глибини різання пов'язана з розміром нерівностей, сформованих на поверхні виробу при попередньому проході інструменту, і неоднорідністю механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Через узагальнену фрактальну розмірність змінна частина глибини різання визначається залежністю:

$$t_{прм} = const \frac{\delta^{3-D_\Sigma}}{Lr^2}, \tag{3.37}$$

де δ – характерний розмір елемента, використовуваного для визначення фрактальної розмірності;

D_Σ – узагальнена фрактальна розмірність;

L – довжина оброблюваної поверхні;

r – радіус впадин на поверхні деталі.

Залежність допустимої швидкості різання від величини механічних властивостей оброблюваного матеріалу, зокрема, твердості, має вигляд

$$v_{60} = \frac{C_v}{HB^*}, \tag{3.38}$$

де C_v – постійна;

$$HB^* = f(D_s).$$

Наявність фрактальної структури в оброблюваному матеріалі і в матеріалі інструменту, оскільки він є гетероструктурним композитом, обумовлює фрактальні температурносилові закономірності процесу різання, які визначають випадковий характер зношування ріжучого інструменту на різних ділянках контакту із стружкою і оброблюваним виробом.

Порівняння стійкості інструменту при точінні матеріалів, що характеризуються різною величиною D_s свідчить про те, що процес точіння однороднішого матеріалу супроводжується менш інтенсивним зношуванням

різального інструменту. Зростання ступеня гетерогенності структури оброблюваного матеріалу приводить до зменшення стійкості інструменту внаслідок підвищення нестабільності процесу різання через зростання ударних навантажень.

Також показано, що характер динамічних навантажень на інструмент залежить від значень фрактальних параметрів оброблюваної поверхні.

Гетерогенність структури матеріалів разом з особливостями обробки безпосередньо впливає на параметри стану поверхневого шару виробів, зокрема, шорсткість обробленої поверхні.

Результати досліджень показали, що неоднорідність структури і властивостей оброблюваного матеріалу в основному впливає на параметри шорсткості поверхні На основі величини фрактальної розмірності сукупності механічних властивостей D_s матеріалу можна прогнозувати значення висотних параметрів нерівностей. При обробці матеріалів, які характеризуються різними величинами фрактальної розмірності сукупності механічних властивостей D_s, досягається різна шорсткість обробленої поверхні.

Запропонована така залежність для оцінки лінійної шорсткості фрактальної поверхні

$$R(x) = R(0)x^{-(1-D_P)}, \tag{3.39}$$

де x – масштабний параметр;

$R(0)$ – проекція профілю перетину поверхні на середню лінію профілю.

Клименко С. А. і Мельнійчук Ю. О. оцінивши фрактальну розмірність поверхнів становили, що можна розрахувати параметри пружно-пластичного контакту шорстких тіл, зокрема, визначити величину фактичної площі контакту, яка є найважливішою характеристикою при розрахунках експлуатаційних показників виробів.

Викладені вищі міркування, показують перспективність використання теорії фрактального аналізу для вдосконалення уявлень про оброблюваність матеріалів різанням, про закономірності процесу обробки матеріалів різанням і дають передумови для розвитку нового напряму – фрактальної теорії різання.

Тому виникає потреба врахування складної форми поверхонь при визначенні раціональних та оптимальних умов обробки точних деталей методами фрактального аналізу. З цією метою розроблено схему алгоритму визначення розмірності Мінковського методом найменших квадратів, та складена відповідна програма, що визначають фрактальну розмірність даних на основі показника Херста.

Як приклад, наведемо фрактальну розмірність поверхні, що отримана в результаті фрезерування поверхні із сталі Ст.3 ДСТУ 2651:2005 торцевою фрезою, що виготовлена із швидкорізальної сталі Р18. При цьому глибина різання складала 0,5 мм, подача змінювалася в межах від 200 до 600 мм/хв, а швидкість обертання шпинделя дорівнювала 250 та 400 об/хв. В результаті проведеного експерименту вимірювали шорсткість обробленої поверхні за допомогою профілографа MarsurfPS1 фірми MahrGmbH та обробляли ці профілограми за допомогою розроблених програм. Встановлено, що фрактальна розмірність поверхонь приймала значення від 1,074 до 1,211, причому вона зростала при збільшенні подачі. Це вказує на те, що при прецизійній обробці деталей необхідно вводити поправочний коефіцієнт на глибину різання як $t = t_0^{\,D}$, а також цю розмірність треба врахувати при визначенні оптимального припуску на обробку точних поверхонь.

Інтерфейс програми розрахунку фрактальної розмірності за Херстом складається із сукупності вікон, які наведені на рис. 3.3 – 3.8.

Таким чином, методологія фрактального аналізу дозволяє отримати інтегральну кількісну оцінку оброблюваності матеріалу різанням шляхом врахування показників, які комплексно характеризують структуру та властивості оброблюваного матеріалу, а також стан поверхні деталі. Крім того, використання дробової розмірності поверхні деталі дозволяє з більшою точністю визначити режими обробки поверхонь деталі, що потребують високих показників їх якості.

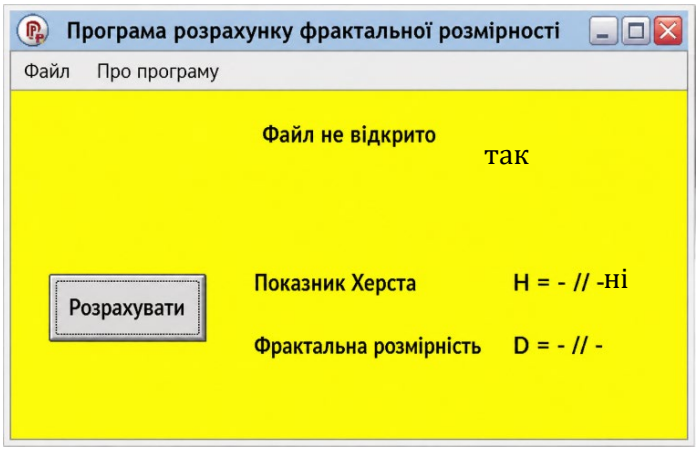


Рис. 3.3.Головне вікно програми розрахунку фрактальної розмірності.

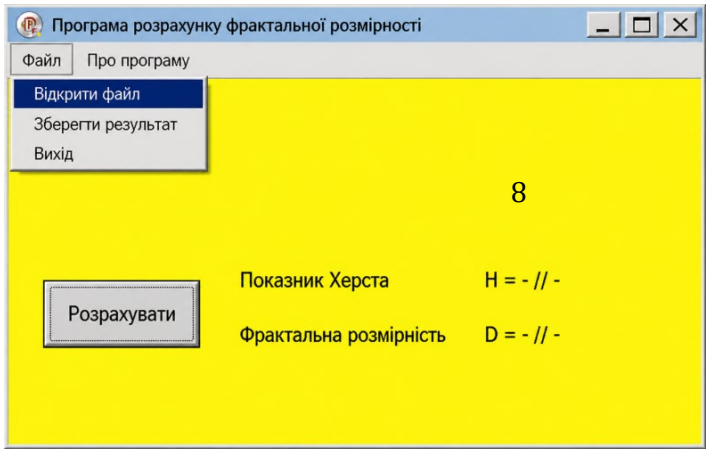


Рис. 3.4. Вікно вибору пункту „Відкрити файл” меню „Файл”.

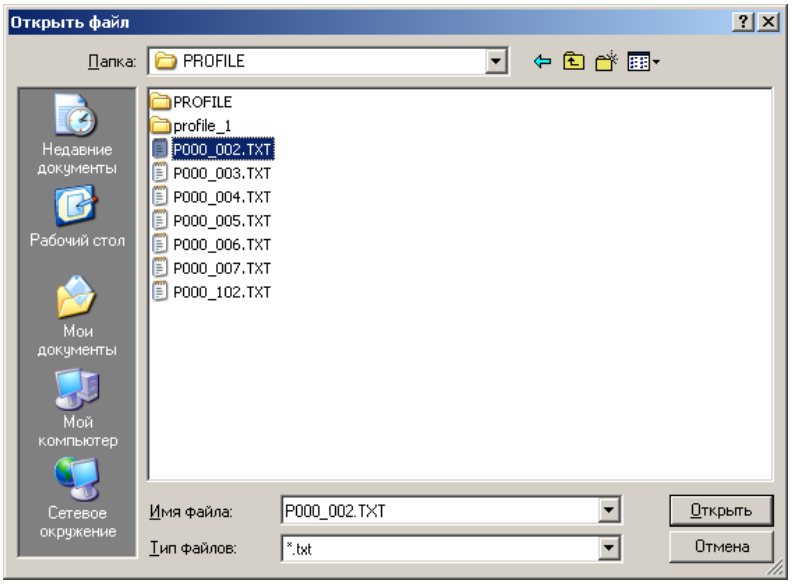


Рис.3.5. Вікно вибору файлу з початковими даними.

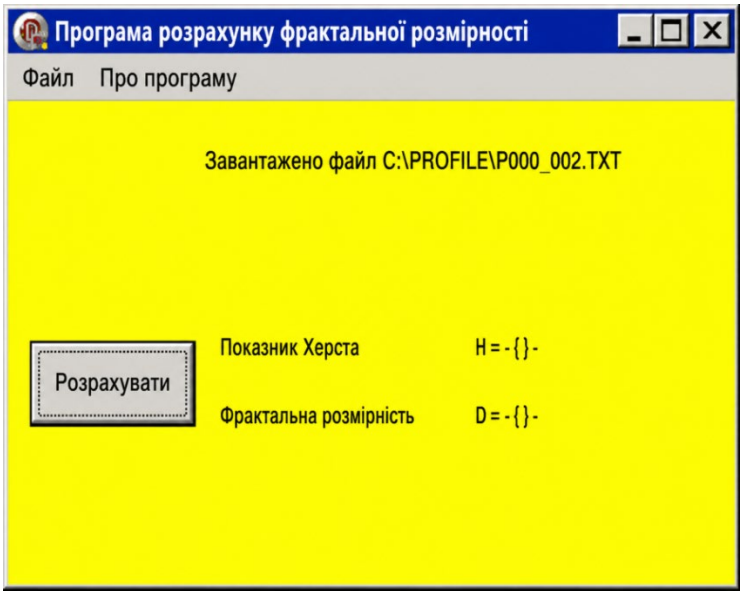


Рис.3.6. Вікно розрахунку фрактальної розмірності.

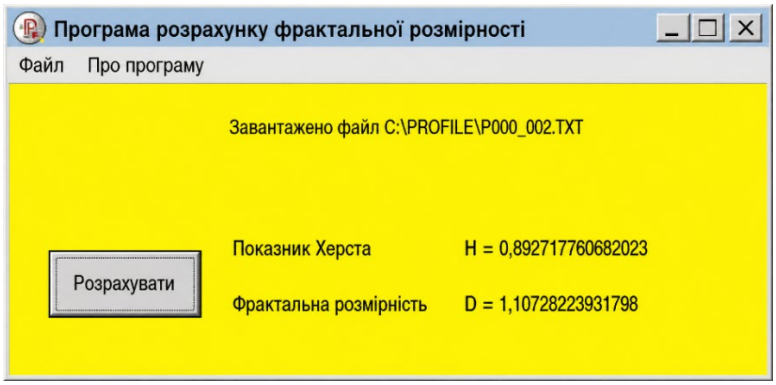


Рис. 3.7. Вікно з результатами визначення фрактальної розмірності.

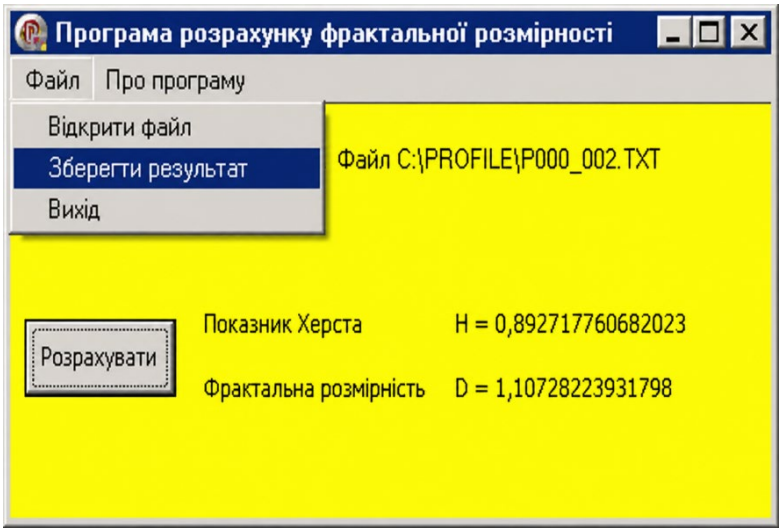


Рис.3.8. Вікно збереження результатів розрахунків.

3.6. Індуктивні методи самоорганізації моделей

3.6.1. Синтез математичних моделей за допомогою методів групового врахування аргументів

Зазвичай при моделюванні технологічних параметрів множина початкових даних надається в вигляді вектора даних $X = \{x_i, x_2, \ldots, x_n\}$, а вихідна змінна – як $\{y(1), y(2), \ldots, y(M)\}$, де M – кількість точок спостереження.

Потрібно на основі дослідних даних побудувати адекватну модель $Y = F(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, причому отримана модель повинна бути найменшої складності. В окремому випадку при розв'язанні задачі прогнозування в якості вихідної змінної використовується модель $Y(M)=x_i$, $(M + K)$, де K – величина інтервалу дослідження.

Характерним для цієї задачі є те, що вид функціональної залежності невідомий, визначено тільки клас моделей, наприклад, поліноміальна модель довільної степені нелінійності або гармонійний ряд (Фур'є), коротка вибірка даних та часові ряди $x_i(t)$ у загальному випадку – нестаціонарні.

Тому тут застосування класичних методів статистичного аналізу (регресійного або дисперсійного) недоцільно, і необхідно використовувати нестандартні методи, наприклад, основані на застосуванні ідей штучного інтелекту. До цих методів відноситься метод групового врахування аргументів (МГВА), запропонований і розвинутий у численних роботах О. Г. Івахненка та його учнів. МГВА є методом індуктивного моделювання складних систем [8, 13, 15, 22].

Основні переваги МГВА полягають в тому, що він не вимагає завдання моделі в явному вигляді – модель конструюється сама в процесі роботи алгоритму та метод працює на коротких вибірках (коли кількість обумовлених коефіцієнтів моделі n менше кількості точок дослідження m). Цей індуктивний метод моделювання, який базується на принципі самоорганізації, потребує незначного об'єму апріорної інформації. Відсутні відомості про об'єкт моделювання комп'ютер одержує за допомогою перебору (послідовної оцінки)

великої кількості варіантів моделей по деяким зовнішнім критеріям. Він відноситься до комбінованих методів – в ньому використовується достовірна інформація про об’єкт та індуктивний перебір моделей – претендентів. Оцінка моделей визначається по порівняно невеликій кількості початкових дослідних даних. Всі інші дані використовується для одержання коефіцієнтів та визначення оптимальної структури моделі. Для одержання коефіцієнтів математичної моделі індуктивний метод самоорганізації використовує метод найменших квадратів, але існують інші методи, де коефіцієнти знаходяться таким же чином як і структура моделі оптимальної складності, за допомогою перебирання варіантів дискретних значень.

Порівнюючи метод регресійного аналізу, що використовується при плануванні експерименту, та метод індуктивної самоорганізації можна зробити наступні висновки. Обидва методи одержання моделей використовують таблиці вихідних дослідних даних, але при регресійному аналізі приходиться довільно призначати структуру одержуваної моделі. Це викликано тим, що критерій середньоквадратичної похибки, розрахований по всім початковим даним, є внутрішнім тому, що для його визначення використовується та ж інформація і ті ж дані, що і для одержання математичної моделі. Будь-який внутрішній критерій порівняння одержуваних моделей призводить до невірного правила: чим складніша модель – тим вона точніша. Складність моделі, наприклад, поліноміальної, оцінюється кількістю та степенем полінома. Чим більше членів полінома, тим менша середньоквадратична похибка. В протилежність методу регресійного аналізу індуктивний метод самоорганізації моделей базується на зовнішніх критеріях, визначення яких основане на інформації, що не використовується при синтезі моделі. Критеріями вибору синтезованих моделей є регулярність, мінімум зміщення, баланс змінних та комбінований критерій.

Ще однією суттєвою різницею регресійного аналізу та методу індуктивної самоорганізації є те, що регресійний аналіз дозволяє будувати моделі в області, коли кількість коефіцієнтів моделі менше кількості точок в

дослідних даних. Алгоритми самоорганізації моделей дозволяють далеко вийти за межу цієї області. Кількість коефіцієнтів моделі може бути значно більшою кількості вихідних даних. Якраз в цій новій області слід шукати найбільш точні моделі. Регресійний аналіз дозволяє одержати тільки відносно прості моделі далеко не оптимальної складності.

Методи самоорганізації направлені на зменшення необхідної апріорної інформації, що вводиться в комп'ютер для одержання моделі. Крім невеликої таблиці початкових дослідних даних треба вказати критерій вибору (селекції) математичної моделі. комп'ютер знаходить єдину модель оптимальної складності за допомогою перебору великої кількості моделей по заданому критерію. Принцип самоорганізації полягає в тому, що при наступному збільшенні складності моделей деякі критерії проходять через свій мінімум. комп'ютер знаходить при перебиранні моделей цей мінімум і вказує єдину модель оптимальної складності.

Основна структура алгоритмів індуктивної самоорганізації математичних моделей складається з таких етапів:

1) попередня обробка вихідної інформації з врахуванням системи вибраних опорних функцій для зменшення множини початкових змінних;

2) генерація множин моделей-претендентів;

3) визначення критеріїв селекції, які є зовнішнім доповненням, та вибір моделі оптимальної складності.

Алгоритми індуктивної самоорганізації розрізняється за другим етапом, тобто за методом створення більш складних варіантів моделі. В залежності від способу генерування варіантів моделі розрізняють алгоритми повної (однорядної) та неповної (багаторядної) індукції.

Алгоритми повної індукції, що називаються також комбінаторними, дозволяють одержати модель із повного поліному шляхом викреслювання (видалення) його складових. Через перегляд всіх можливих варіантів часткових моделей ці алгоритми потребують багато часу для розрахунків та значного

об’єму пам’яті комп’ютер. Тому однорядні алгоритми самоорганізації доцільно використовувати тільки при порівняно невеликій кількості аргументів.

В однорядному методі кількість можливих комбінацій моделей швидко зростає зі збільшенням кількості аргументів p та степені повного поліному q, тобто з ростом кількості його членів. В якості верхньої границі можливої кількості варіантів можна вибрати 2^{20}, тобто повний поліном повинен містити в собі не більше 20 складових. Ця границя залежить від використовуваного комп’ютера та мистецтва програміста.

Багаторядні алгоритми індуктивної самоорганізації моделей оптимальної складності в залежності від вибраного способу генерації бувають як багаторядні алгоритми з пороговим відбором, алгоритми багаторядної селекції з використанням комбінованого перебору часткового опису, багаторядні алгоритми з зануленням коефіцієнтів та інші.

В відповідності з принципом самоорганізації таких моделей на першому ряду утворюються часткові моделі, які попарно враховують аргументи:

$$y_k^1 = \varphi(x_i, x_j),\ i = 1,2...,m\ \ j = 1,2,...,m \quad \text{при} \quad i \neq j, \tag{3.40}$$

де x – аргументи одержаної моделі;

m – кількість аргументів (вихідних даних);

φ – визначений вигляд опорної функції.

Для k-го ряду вибрані на попередньому етапі r моделей знову попарно комбінуються, тобто

$$y_S^k = \varphi\left(y_i^{k-1}, y_j^{k-1}\right), \quad i = 1,2,...,r; \quad j = 1,2,\ldots,r; \quad i \neq j. \tag{3.41}$$

В більшості випадків використовують кількість моделей, що вибираються на кожному етапі однакову, тобто $m_1 = m_2 = \ldots = m_r = F$, де F визначає вільність вибору рішень.

Багаторядні алгоритми групового врахування аргументів розрізняються виглядом опорних функцій. Частіше всього використовують алгебраїчні поліноми та різні аналоги диференційних рівнянь. Використовують також

гармонічні функції та формули Байєса. В багаторядних алгоритмах МГВА складність моделі зростає від ряду до ряду. При цьому через пороговий відбір деяка кількість часткових моделей втрачається тому, що вибирається *m* кращих моделей, де *m* – вільність вибору за Д. Габором. В оптимальних за об'ємом розрахунках часткові моделі вибирають лінійними, а в кожному ряду реалізується повна парна комбінація із *m* – аргументів, що вибрані за допомогою селекції.

Алгоритм МГВА дозволяє використовувати різні модифікації дій в залежності від вибраного способу конкуренції часткових описів, правил зупинки, виду критерію та способу заповнення вихідного масиву для кожного ряду селекції.

Алгоритм розрахований на те, що мінімальна кількість дослідних точок повинна бути більша довжини часткового опису моделі. В першому ряду селекції створюються всі пари аргументів, що виникли, та для кожної із них знаходиться часткова модель, вигляд якої залежить від довжини часткового опису. Оцінки коефіцієнтів часткових моделей розраховуються за частиною даних, що називається навчальною послідовністю. Із усіх часткових моделей *d* першому ряду селекції другому ряду селекції створюються пари вхідних змінних, що пройшли перший ряд, та для кожної з них знаходяться часткові моделі другого ряду і т. д. Нарощування рядів селекції продовжується до тих пір, поки основний критерій селекції не стане зростати. Максимальну кількість рядів селекції вибирають рівною кількості вхідних змінних. Якщо при переході з ряду в ряд зміна значення основного критерію селекції стане менше встановленого значення *e*, то на цьому робота алгоритму припиняється. Таким чином буде отримана краща модель досліджуваного процесу (об'єкту).

В алгоритмах індуктивного методу самоорганізації моделей використовують, так звані, зовнішні критерії вибору, тобто критерії, для визначення яких беруть частину даних, що називається перевірочною послідовністю, яка не була використана при синтезі моделі. В якості зовнішніх

критеріїв застосовується критерій регулярності, мінімуму зміщення, балансу змінних, збіжності покрокового інтегрування та комбінований.

Метод індуктивної самоорганізації математичних моделей доцільно використовувати в наступних випадках:

1) об’єкт дослідження не є керованим;

2) дослідні дані одержані в результаті проведення пасивного експерименту;

3) початкові дані для обчислення моделі одержані статистичною обробкою інформації;

4) експеримент є керованим, але комбінація значень аргументів не досягнута, або ж призводить до аварійної (критичної) ситуації;

5) проведення планового експерименту потребує довготривалих та багатовитратних досліджень;

6) для одержання початкових даних про характер впливу окремих аргументів на вихідну величину.

Як приклад наведемо використання методу багаторядної селекції з пороговим само відбором часткових описів для отримання математичної моделі, стійкості різців, що оснащені твердосплавними пластинками ВК4, при обробці титанового сплаву ВТ6. В ході експериментальних досліджень швидкість різання V змінювалась в межах від 70 до 200 м/хв., подача s– від 0.08 до 0.4 мм/об., а глибина різання – від 1 до 4 мм. Крайки різальних інструментів мали такі геометричні параметри: γ=-10°, α=8°, φ=45°, φ=10°, λ=0°, r=1 мм. В якості критерію зношування інструменту вибрано знос по задній грані, що складав 0.9 – 1 мм. В результаті обробки експериментальних даних на третьому ряду селекції отримано залежність:

$$T=1.089435372485+0.000000000001\ C_6+0.769697986466\ C_2+ \quad (3.42)$$

$$+0.000000000001\ C_6C_2,$$

де $C_6=1.2671044485–0.069158877D_1+0.277018428\ D_2+0.093129389\ D_1D_2$;

$C_2=1.29045427–0.164052454\ D_5+0.467286992\ D_6+0.065810678\ D_5D_6$;

D_1=1.206697396+0.911622389 (1/V)–2.323033584 (1/t)+
+797.192586989 (1/V)(1/t);

D_2=1.322925655–0.18516914 (1/s)+5.4492744037 (1/t)+
+0.103515648 (1/s)(1/t);

D_5= –3.050483578–0.001092397 V+1041.329754278 (1/V);

D_6=0.924656261+0.600523631 s+4.797505727 t–2.21292332 s t.

3.6.2. Нечіткий метод групового врахування аргументів

Наведений вище МГВА, який в подальшому називатимемо класичним, має певні недоліки: при близьких експериментальних точках можливе явище виродженості матриці нормальних рівнянь Гауса („індуцит” у термінології О.Г. Івахненка), внаслідок чого виникає необхідність застосування спеціальних методів регуляризації; метод дає точкову модель (прогноз), а в ряді випадків бажано мати довірчий інтервал, що характеризує точність прогнозу.

В останній час Ю.П. Зайченком розроблено новий метод, який позбавлений зазначених недоліків. Таким методом є нечіткий МГВА (НМГВА), що створює інтервальну модель регресії і, для знаходження моделі (прогнозу), не використовує метод найменших квадратів. Тому в нечіткому МГВА явище виродженості відсутнє [8, 15].

Для побудови часткової моделі НМГВА використано лінійну інтервальну регресійну модель, що визначена як:

$$Y = B_1 z_1 + B_2 z_2 + \ldots + B_n z_n \tag{3.43}$$

де z_i – деякі відомі змінні;

B_i – інтервали, які можна задати нечіткими числами і записати в вигляді центра α_i ширини c_i :

$$B_i = (\alpha_i, c_i) . \tag{3.44}$$

Виходячи з цього, вихідну величину Y можна розрахувати як:

$$Y = \left(\sum \alpha_i z_i \sum C_i \mid z_i \mid\right) \tag{3.45}$$

Відношення вкладеності двох інтервалів B_i і B_j ($B_i \subset B_j$) можна задати такими нерівностями: $\alpha_j - c_j \le \alpha_i - c_i$, $\alpha_j + c_j \ge \alpha_i + c_i$.

У нашому випадку змінні z_i пов'язані зі змінними x_i і x_j для відповідної часткової моделі НМГВА як:

$$z_1 = 1,\ z_2 = x_i,\ z_3 = x_j,\ z_4 = x_1^2,\ldots,\ z_{n-1} = x_i \cdot x_j^{r-1},\ z_n = x_j^r \tag{3.46}$$

Оцінювання отриманої лінійної інтервальної регресійної моделі здійснюється наступним чином. Нехай є M спостережень $(n+1)$-ї змінної, причому n з них – незалежні величини, а $(n + 1)$-а змінна залежить від інших, і цю залежність (x_i, …, x_n, y) треба визначити. При цьому $x_i=(x_{i1}, \ldots, x_{iM})$ і $y=(y_i, \ldots, y_M)$ – вхідні і вихідні вектори точок спостереження. Тоді оціночна лінійна інтервальна модель для часткової моделі НМГВА матиме такий вигляд:

$$Y_i^* = A_{00}^* + A_{10}^* x_i + A_{11}^* x_j + A_{20}^* x_i^2 + \ldots + A_{rr-1}^* x_i x_j^{r-1} + A_{rr}^* x_j^2 \tag{3.47}$$

Побудова оціночної моделі здійснюється з урахуванням наступних вимог:

1) задані значення y_j, що спостерігаються, включаються в оціночний інтервал $Y_j^{\bullet}$;

2) ширина оціночного інтервалу повинна бути мінімальною.

Ці вимоги можна звести до задачі лінійного програмування в такому вигляді (для k-тої точки спостереження):

$$\min(c_0 + c_1 \cdot \mid X_{ki} \mid + \ldots + c_{C_{r+1}^2 - 1} \cdot \mid X_{ki} \cdot X_{kj}^{r-1} \mid + c_{C_{r=1}^2} \cdot \mid X_{kj}^r \mid); \tag{3.48}$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + \ldots + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r - (c_0 + c_1 \cdot \mid X_{ki} \mid + \ldots + c_{C_{r+1}^2} \cdot \mid X_{kj}^r \mid) \le Y_k; \tag{3.49}$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + \ldots + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r + (c_0 + c_1 \cdot \mid X_{ki} \mid + \ldots + c_{C_{r+1}^2} \cdot \mid X_{kj}^r \mid) \ge Y_k; \tag{3.50}$$

$$c_p \geq 0, p = \overline{1.C_{r+1}^2}$$

Виходячи з цього, при відомих значеннях змінних x_i і величини y, що отримані в результаті M вимірів, приходимо до такої задачі пошуку коефіцієнтів моделі (для всіх точок спостереження):

$$\min\left(c_0 \cdot M + c_1 \cdot \sum_{k=1}^{M} \left| X_{ki} \right| + ... + c_{C_{r+1}^2 - 1} \cdot \sum_{k=1}^{M} \left| X_{ki} \cdot X_{kj}^{r-1} \right| + c_{C_{r+1}^2} \cdot \sum_{k=1}^{M} \left| X_{kj}^{r} \right| \right); \qquad (3.51)$$

при обмеженнях

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + ... + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r - (c_0 + c_1 \cdot | X_{ki} | + ... + c_{C_{r+1}^2} \cdot | X_{kj}^r |) \leq Y_k; \qquad (3.52)$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + ... + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r + (c_0 + c_1 \cdot | X_{ki} | + ... + c_{C_{r+1}^2} \cdot | X_{kj}^r |) \geq Y_k; \qquad (3.53)$$

$$k = \overline{1, M}; \qquad c_p \geq 0, \qquad p = \overline{1, C_{r+1}^2},$$

де k – номер виміру, дані з якого використовуються в розрахунках.

Задача полягає в тому, щоб мінімізувати область зміни вихідних значень Y за рахунок знаходження таких значень ширини інтервалів – коефіцієнтів c_i, які визначаються, і таких значень центрів інтервалів α_i, i=1,2,…,C_{r+1}^2, які забезпечували б мінімальне розсіювання величини Y одночасно з виконанням умови, що всі вимірювані значення величини, що визначається, знаходяться в цьому інтервалі. Дана задача є задачею лінійного програмування. Для її розв'язання перейдемо до двоїстої задачі. Вона запишеться в такий спосіб:

$$\max\left(\sum_{k=1}^{M} Y_k \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^{M} Y_k \delta_k \right); \qquad (3.54)$$

$$\left.\begin{array}{c} \sum\limits_{k=1}^{M}\delta_k+\sum\limits_{k=1}^{M}\delta_{k+M}\le M \\ \sum\limits_{k=1}^{M}\left|X_{ki}\right|\delta_k+\sum\limits_{k=1}^{M}\left|X_{ki}\right|\delta_{k+M}\le\sum\limits_{k=1}^{M}\left|X_{ki}\right| \\ \cdots \\ \sum\limits_{k=1}^{M}\left|X_{kj}^2\right|\delta_k+\sum\limits_{k=1}^{M}\left|X_{kj}^2\right|\delta_{k+M}\le\sum\limits_{k=1}^{M}\left|X_{kj}^2\right| \end{array}\right\} \qquad (3.55)$$

$$\left.\begin{array}{c} \sum\limits_{k=1}^{M}\delta_{k+M}-\sum\limits_{k=1}^{M}\delta_k=0 \\ \sum\limits_{k=1}^{M}X_{ki}\delta_{k+M}-\sum\limits_{k=1}^{M}X_{ki}\delta_k=0 \\ \cdots \\ \sum\limits_{k=1}^{M}X_{kj}^2\delta_{k+M}-\sum\limits_{k=1}^{M}X_{kj}^2\delta_k=0 \end{array}\right\} \qquad (3.56)$$

$$\delta_k\ge 0; \qquad k=\overline{1,2M}$$

Розв'язавши двоїсту задачу симплекс-методом і одержавши оптимальні значення двоїстих змінних, зможемо знайти й оптимальні значення необхідних змінних α_i, i=1,2,…,C_{r+1}^2, а разом з цим і визначити математичну модель у вигляді залежності (3.47).

Для отримання моделі другого ряду необхідно задати опорну функцію, аргументами якої є функції-моделі, що отримані у попередньому ряді.

У нашому випадку опорна функція задається також поліномом другого (r–того) ступеня від двох змінних, тобто

$$Y_{ij}^{\,k+1} = f\left(Y_i^{\,k}, Y_j^{\,k}\right),$$

де k – номер ряду.

У кожному ряду після генерації всіх можливих моделей за комплексним критерієм у площині критеріїв відбираються F кращих моделей, що беруть участь у подальшій генерації. Критерієм зупинки процесу генерації є близькість середнього критерію моделей на двох сусідніх рядах роботи методу, тобто:

$$-\varepsilon < N_{см}^{k+1} - N_{см}^{k} < \varepsilon . \quad (3.57)$$

При генерації моделей може виникнути явище індуциту, що пов'язане з тим, що після ряду ітерацій F моделей k-го ряду вони стануть майже нерозрізнені між собою (стануть колінеарними). Для боротьби з цим явищем вид опорної функції не змінюють, а замість одного з аргументів беруть модель попереднього ряду, тобто

$$Y_{ij}^{k+1} = f(Y_i^{k-1}, Y_j^{k}) .$$

3.6.3. Використання нечіткого методу групового врахування аргументів для моделювання та прогнозування технологічних параметрів

Загальний вигляд інтерфейсу системи моделювання НМГА представлено на рис. 3.12.

Приклад 1. Моделювання та прогнозування величини зносу різального інструменту по задній грані h [8].

В результаті проведення експериментальних досліджень процесу точіння деталей із сталей 45, 12Х18Н9Т, 40ХН2МА, 07Х16Н6 та 15Х16Н2АМШ різцями, різальна крайка яких була виготовлена із твердих сплавів ВК8, КНТ16, ТН20, Т15К6 та Т5К10, отримано значення зносу різальної крайки інструменту h. При цьому режими обробки деталей варіювались в таких межах: швидкість різання V – від 47,1 до 188,4 м/хв, подача S – від 0,07 до 0,28 мм/об, а глибина різання t – від 0,5 до 1 мм. Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.2.

Обробка результатів експерименту методами НМГВА дозволила отримати таку математичну залежність величини зносу інструменту від матеріалів оброблюваної деталі та різальної крайки інструменту, а також режимів різання – швидкості V, подачі S та глибини різання t:

$$h = 4{,}53+0{,}717\cdot Mat\cdot Ins+0{,}07186\cdot Ins+0{,}0148\cdot Mat\cdot Ins^2+2{,}426\cdot Mat+0{,}2576\cdot Mat*$$
$$*(Ins/(V\cdot t))+0{,}001613\cdot(V\cdot S)/t+0{,}003855\cdot((V\cdot S)/t)\cdot((Ins\cdot t)/S)+0{,}000153\cdot((V\cdot S)/t)^2+$$

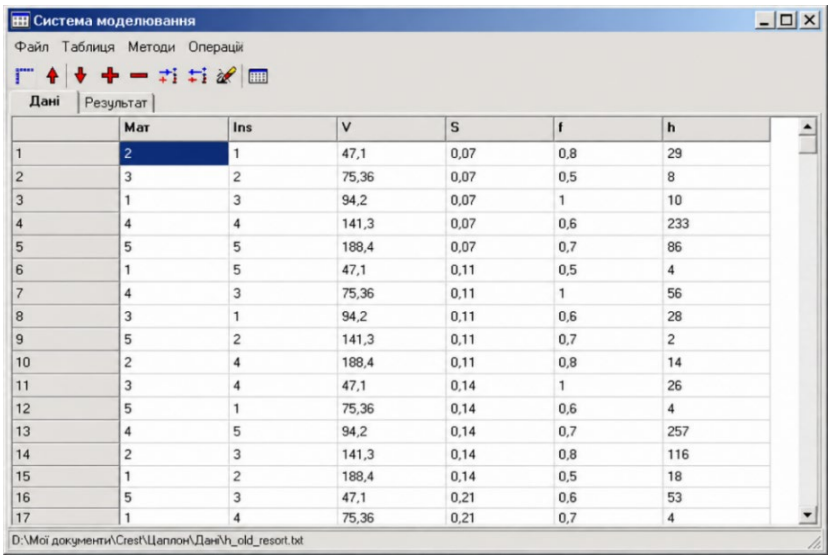
$$+0{,}00007198\cdot((Ins\cdot t)/S)^2++0{,}0161\cdot Mat\cdot((V\cdot S)/t)+0{,}0385\cdot Mat\cdot((V\cdot S)/t)\cdot((Ins\cdot t)/S)+$$
$$+0{,}001526\cdot Mat\cdot((V\cdot S)/t)^2+0{,}00072\cdot Mat\cdot((Ins\cdot t)/S)^2+0{,}0017\cdot Mat\cdot(Ins/(V\cdot t))\cdot((V\cdot S)/t)+$$
$$+0{,}0041\cdot Mat\cdot(Ins/(V\cdot t))\cdot((V\cdot S)/t)\cdot((Ins\cdot t)/S)+0{,}000162\cdot Mat\cdot(Ins/(V\cdot t))\cdot((V\cdot S)/t)^2+$$
$$+0{,}00007635\cdot Mat\cdot(Ins/(V\cdot t))\cdot((Ins\cdot t)/S)^2,$$

де h – величина зносу різального інструменту по задній грані, мкм; *Mat* – код оброблюваного матеріалу (1 – Сталь45; 2 – 12Х18Н9Т; 3 – 40ХН2МА; 4 – 07Х16Н6; 5 – 15Х16Н2АМШ); *Ins* – код матеріалу різальної крайки інструменту (1 – ВК8; 2 – КНТ16; 3 – ТН20; 4 – Т15К6; 5 – Т15К10).

*Таблиця3.2.***Результатиекспериментальнихдосліджень**

№ п/п	**Оброблюваний матеріал**	**Різальний інструмент**	***V*, м·хв.$^{-1}$**	***s*, мм·об$^{-1}$**	***t*, мм**	***h*, мкм**	***Rz*, мкм**
1	2	1	47,1		0,8	29	3
2	3	2	75,36		0,5	8	2,7
3	1	3	94,2	0,07	1	10	8
4	4	4	141,3		0,6	233	10
5	5	5	188,4		0,7	86	3
6	1	5	47,1		0,5	4	23
7	4	3	75,36		1	56	5
8	3	1	94,2	0,11	0,6	28	5,5
9	5	2	141,3		0,7	2	4
10	2	4	188,4		0,8	14	3
11	3	4	47,1		1	26	7,5
12	5	1	75,36		0,6	4	4
13	4	5	94,2	0,14	0,7	257	8
14	2	3	141,3		0,8	116	12
15	1	2	188,4		0,5	18	4,2
16	5	3	47,1		0,6	53	10,5
17	1	4	75,36		0,7	4	16
18	2	2	94,2	0,21	0,8	3	3,6
19	3	5	141,3		0,5	170	13
20	4	1	188,4		1	134	3,6
21	4	2	47,1		0,7	15	12
22	2	5	75,36		0,8	11	13,7
23	5	4	94,2	0,28	0,5	83	10
24	1	1	141,3		1	35	7
25	3	3	188,4		0,6	220	4

З метою порівняння звичайного методу групового врахування аргументів та нечіткого МГВА виконано прогнозування величини зносу різального інструменту за дев’ятьма дослідами.



	Mat	Ins	V	S	f	h
1	2	1	47,1	0,07	0,8	29
2	3	2	75,36	0,07	0,5	8
3	1	3	94,2	0,07	1	10
4	4	4	141,3	0,07	0,6	233
5	5	5	188,4	0,07	0,7	86
6	1	5	47,1	0,11	0,5	4
7	4	3	75,36	0,11	1	56
8	3	1	94,2	0,11	0,6	28
9	5	2	141,3	0,11	0,7	2
10	2	4	188,4	0,11	0,8	14
11	3	4	47,1	0,14	1	26
12	5	1	75,36	0,14	0,6	4
13	4	5	94,2	0,14	0,7	257
14	2	3	141,3	0,14	0,8	116
15	1	2	188,4	0,14	0,5	18
16	5	3	47,1	0,21	0,6	53
17	1	4	75,36	0,21	0,7	4

Рис. 3.12. Загальний вигляд інтерфейсу системи моделювання.

Порівняння результатів прогнозування класичним МГВА та нечітким МГВА, які наведені в таблицях 3.3 і 3.4 та на рис. 3.13 і 3.14, показує, що середньоквадратичне відхилення прогнозованих значень від даних, що отримані в результаті проведеного експерименту, при використанні нечіткого методу менше ніж при класичному МГВА. Це дозволяє зробити висновок, що НМГВА дає більш якісне прогнозування величини зносу різального інструменту в порівнянні зі звичайним методом.

Таблиця 3.3. **Результати прогнозування величини зносу різального інструменту класичним МГВА**

Прогнозоване значення	**Дійсне значення**	**Відхилення**
61,53	53	8,526
24,56	4	20,56
15,335	3	12,335
130,137	170	39,863
83,383	134	50,617
24,115	15	9,115
36,064	11	25,064
91,135	83	8,13545
10,188	35	24,81
	Середньо квадратичне відхилення	26,23

Таблиця 3.4. **Прогнозування величини зносу різального інструменту *h* нечітким МГВА**

№ досліду	Ліва межа	Прогнозоване значення	Права межа	Дійсне значення	Відхилення
1	27,239	60,674	94,11	53	7,6737
2	0	22,505	53,392	4	18,5
3	0	14,101	39,495	3	11,101
4	82,723	134,123	185,523	170	35,877
5	37,045	88,445	139,845	134	45,55
6	9,9375	23,2032	36,469	15	8,203
7	0	33,56	68,59	11	22,56
8	38,922	90,322	141,722	83	7,322
9	0	12,67	32,73	35	22,33
				Середньо квадратичне відхилення	23,6

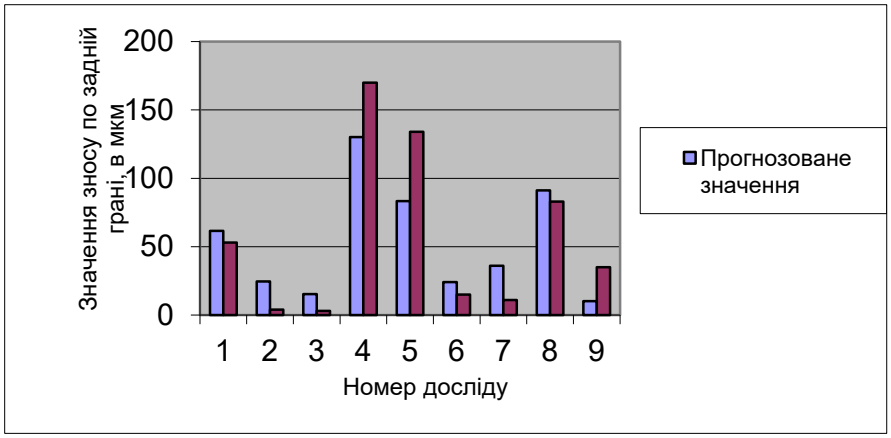


Рис. 3.13. Результати прогнозування величини зносу інструмента *h* класичним МГВА.

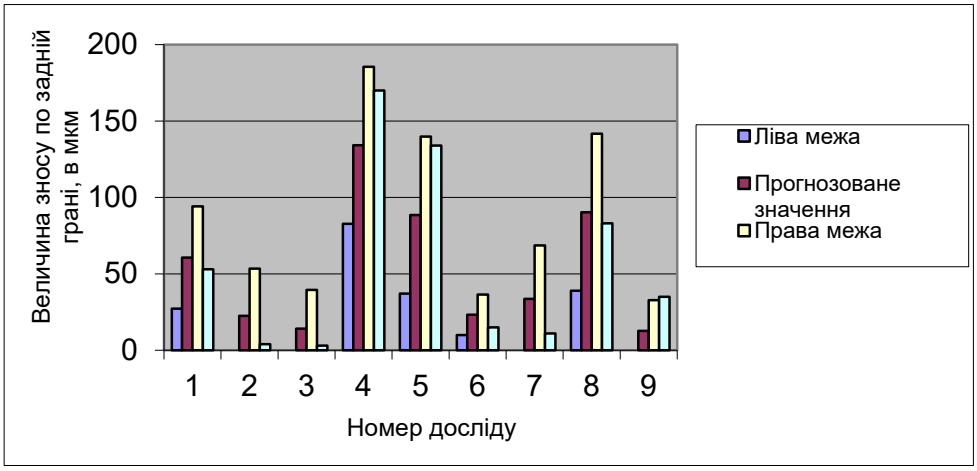


Рис. 3.14. Результати прогнозування величини зносу інструменту *h* нечітким МГВА.

Приклад 2.*Моделювання сил різання*.

Виконано експериментальні дослідження складових сил різання при фінішній обробці фрезеруванням алюмінієвого сплаву АК6 на фрезерному верстаті 6Б75ВФ1. При цьому обробка здійснювалась кінцевою фрезою з швидкорізальної сталі *Р18* діаметром $D = 16$ мм та кількістю зубців $z = 3$. Режими проведених досліджень варіювались в таких межах: швидкість різання V = 50 – 200 м/хв, подача *Sм* = 50..200 мм/хв; глибина фрезерування t = 0,5..1 мм при ширині фрезерування B = 1...3 мм; кількість обертів n = 1120..2240 об/хв.)

Обробка результатів дослідження з метою отримання математичної моделі складових сил різання здійснювалась нечітким методом групового аргументів за допомогою системи моделювання.

*Таблиця3.6.***Прогнозуваннявеличинишорсткостіобробленоїповерхнінечітким МГВА**

Ліва межа	**Прогнозоване значення**	**Права межа**	**Дійсне значення**	**Відхилення**
7,386771472	9,752159373	12,11754727	10,5	0,747841
11,08386244	14,48379362	17,8837248	16	1,516206
4,258352348	6,040485726	7,822619104	3,6	2,440486
9,177944493	12,83012629	16,48230809	13	0,169874
1,747010581	2,897010581	4,047010581	3,6	0,702989
9,031836128	10,56152726	12,09121838	12	1,438473
11,51596007	15,647525	19,77908993	13,7	1,947525
8,546805288	11,25760227	13,96839926	10	1,257602
5,943186444	7,093186444	8,243186444	7	0,093186
7,386771472	9,752159373	12,11754727	10,5	0,747841
			Середньоквадратичне відхилення	1,365832

В результаті цього отримано залежності сили різання R від режимів різання, які представлені верхньою граничною межею сили *Rв*, нижньою межею *Rн* та серединнім значенням діапазону *Rс*:

$$Rв = 1{,}29+0{,}9616\times B+0{,}44\times B\times t+0{,}094365\times Sz\times V+7{,}491\times 10^{-6}\times V^2+0{,}2934\times$$
$$\times B\times Sz\times V+2{,}33\times 10^{-5}\times B\times V^2+0{,}13445\times B\times t\times Sz\times V+1{,}067\times 10^{-5}\times B\times t\times V^2+0{,}06977\times$$
$$\times B^2+0{,}06394\times B^2\times t+0{,}01465\times B^2\times t^2+5{,}6287\times 10^{-5}\times Sz^2\times V^2+8{,}937\times 10^{-9}\times Sz\times V^3+$$
$$+3{,}5474\times 10^{-13}\times V^4;$$

$$Rc = 0{,}4765+0{,}96158\times B+0{,}4406\times B\times t+0{,}09436\times Sz\times V+7{,}49136\times 10^{-6}\times V^2+$$
$$+0{,}29339\times B\times Sz\times V+2{,}329\times 10^{-5}\times B\times V^2+0{,}13445\times B\times t\times Sz\times V+1{,}06733\times 10^{-5}\times B\times t\times$$
$$\times V^2+0{,}06977\times B^2+0{,}063944\times B^2\times t+0{,}014651\times B^2\times t^2+5{,}6287\times 10^{-5}\times Sz^2\times V^2+$$
$$+8{,}937\times 10^{-9}\times Sz\times V^3+3{,}5474\times 10^{-13}\times V^4;$$

$$R_н = -0{,}337+0{,}96158\times B+0{,}4406\times B\times t+0{,}0943\times Sz\times V+7{,}49\times 10^{-6}\times V^2+$$
$$+0{,}2934\times B\times Sz\times V+2{,}3292\times 10^{-5}\times B\times V^2+0{,}13445\times B\times t\times Sz\times V+1{,}06733\times 10^{-5}\times B\times t\times$$
$$\times V^2+0{,}06977\times B^2+0{,}063944\times B^2\times t+0{,}01465\times B^2\times t^2+5{,}6287\times 10^{-5}\times Sz^2\times V^2+ +8{,}937\times$$
$$\times 10^{-9}\times Sz\times V^3+3{,}5474\times 10^{-13}\times V^4,$$

де V – швидкість різання; Sz -, подача на зуб; t– глибина різання; B – ширина фрезерування.

Приклад3.*Моделювання стійкості різального інструменту*.

При моделюванні періода стійкості інструмента виконували токарну обробку титанового сплаву ВТ2 прохідними різцями з механічним кріпленням пластинок з твердих сплавів ВК2, ВК3, ВК4, ВК6, ВК6М, ВК8, Т5К10 та Т15К6. Геометричні параметри різальної крайки інструменту вибрані згідно з рекомендаціями НДІАТ, а саме: $\gamma=0^0$; $\alpha=\alpha_1=10^0$; $\varphi=45^0$; $\varphi_1=10^0$; $\lambda=0^0$; r=1 мм. В якості критерію зношеності різального інструменту було прийнято сумарний знос по задній грані величиною 0,9 мм.

При проведенні досліджень швидкість різання змінювалась в межах від 20 м/хв. до 140 м/хв., подача – від 0.11 мм/об до 1,5 мм/об, а глибина різання варіювалась від 1 мм до 4,5 мм.

В результаті обробки результатів експериментальних досліджень за нечітким методом групового врахування експериментів за допомогою створеної системи моделювання отримано таку залежність стійкості різального інструменту від його матеріалу та режимів різання при токарній обробці титанового сплаву ВТ2:

$$T_u=2.4357+120.9\cdot(1/mat)\cdot(1/V)+41.76784\cdot(1/V)^2+2957.69\cdot(1/mat)^2\cdot(1/V)^2+$$
$$+2043.49\cdot(1/mat)\cdot(1/V)^3+352.96734\cdot(1/V)^4+0.0014629\cdot((V\cdot S)/mat)+$$
$$+1.9958\cdot 10^{-6}\cdot((V\cdot S)/mat)^2+0.06\cdot(1/mat)\cdot(1/V)\cdot((V\cdot S)/mat)+29832.23\cdot(1/mat)^3\cdot(1/V)^3+$$

$+30917.04\cdot(1/mat)^2\cdot(1/V)^4++10680.43\cdot(1/mat)\cdot(1/V)^5+8.19\cdot10^{-5}\cdot(1/mat)\cdot(1/V)\cdot$
$\cdot((V\cdot S)/mat)^2+0.02074\cdot(1/V)^2\cdot((V\cdot S)/mat)+1229.86\cdot(1/V)^6+$
$+2.829\cdot10^{-5}\cdot(1/V)^2\cdot((V\cdot S)/mat)^2+1.0419\cdot(1/mat)^2\cdot(1/V)^2\cdot((V\cdot S)/mat)+$
$+258844.19\cdot(1/mat)^4\cdot(1/V)^4+357675.59\cdot(1/mat)^3\cdot(1/V)^5+185340.98\cdot(1/mat)^2\cdot(1/V)^6+$
$+0.00142\cdot(1/mat)^2\cdot(1/V)^2\cdot((V\cdot S)/mat)^2+0.71986\cdot(1/mat)\cdot(1/V)^3\cdot((V\cdot S)/mat)+$
$+42684.58\cdot(1/mat)\cdot(1/V)^7+0.000982\cdot(1/mat)\cdot(1/V)^3\cdot((V\cdot S)/mat)^2+$
$+0.124\cdot(1/V)^4\cdot((V\cdot S)/mat)++3686.3959\cdot(1/V)^8+0.000169\cdot(1/V)^4\cdot((V\cdot S)/mat)^2,$

де *mat*– код матеріалу різальної пластинки різця: 1 – ВК2; 2 – ВК3; 3 – ВК4; 4 – ВК6; 5 – ВК6М; 6 – ВК8; 7 – Т5К10; 8 – Т15К6.

Отримана залежність дозволяє вибрати найбільш ефективний матеріал різальної пластинки та оптимальні режими точіння сплаву ВТ2 цим інструментом.

Наведені приклади показали, що нечіткий МГВА має переваги перед звичайним МГВА завдяки отриманню значень прогнозованих вихідних параметрів не в окремій точці, а в визначеному інтервалі.

Використання НМГВА виключає явище виродженості системи лінійних алгебраїчних рівнянь при визначенні коефіцієнтів математичної моделі за допомогою метода найменших квадратів шляхом застосування з метою отримання моделі методів лінійного програмування.

Нечіткий МГВА дозволяє отримати математичні моделі оптимальної складності, які з більшою точністю описують досліджуваний процес в порівнянні зі звичайним МГВА.

Таким чином, використання нечіткого МГВА при моделюванні та прогнозуванні технологічних параметрів (величини зносу різальної крайки інструменту, шорсткості обробленої поверхні, періоду стійкості різального інструменту та сили різання) показало його ефективність при розв’язанні різноманітних технологічних задач.

3.7. Моделювання технологічних параметрів шляхом використання штучних нейронних мереж

Нейронні мережі як спосіб дослідження інформації

В останні десятиліття бурхливо розвивається нова прикладна область математики, що спеціалізується на штучних нейронних мережах (НМ). Актуальність досліджень в цьому напрямку підтверджується розмаїттям різних застосувань НМ. Це автоматизація процесів розпізнавання образів, адаптивне управління, апроксимація, прогнозування, створення експертних систем, організація асоціативної пам'яті і багато інших можливостей використання [11, 12, 42, 43].

Широке коло задач, що вирішуються ШНМ, не дозволяє в даний час створювати універсальні, могутні мережі, змушуючи розробляти спеціалізовані ШНМ, що функціонують за різними алгоритмами.

Моделі ШНМ можуть бути програмного і апаратного виконання. Надалі розглядатимемо в основному програмну реалізацію нейронних мереж .

Не зважаючи на істотні відмінності, окремі типи ШНМ мають декілька загальних рис.

По-перше, основу кожної НМ складають відносно прості, в більшості випадків – однотипні, елементи (осередки), що імітують роботу нейронів мозку. Далі під нейроном будемо розуміти штучний нейрон, тобто осередок ШНМ. Кожен нейрон характеризується своїм поточним станом за аналогією з нервовими клітинами головного мозку, які можуть бути збуджені або загальмовані. Він має групу синапсів – одно направлених вхідних зв'язків, сполучених з виходами інших нейронів, а також має аксон – вихідний зв'язок даного нейрона, з яким сигнал (збудження або гальмування) поступає на синапси наступних нейронів. Кожен синапс характеризується величиною синапсичного зв'язку або її вагою w_i, яка за фізичним сенсом еквівалентна електричній провідності.

Поточний стан нейрона визначається як зважена сума його входів:

$$s = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot w_i \tag{3.58}$$

Вихід нейрона є функцією його стану:

$$y = f(s) \tag{3.59}$$

Нелінійна функція *f* називається активаційною і може мати різний вигляд. Однією з найбільш розповсюджених є нелінійна функція з насиченням, так звана логістична функція або сигмоїд:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}} \tag{3.60}$$

Повертаючись до загальних рис, властивих всім ШНМ, відзначимо, по-друге, принцип паралельної обробки сигналів, який досягається шляхом об'єднання великого числа нейронів в так звані шари і з'єднання певним чином нейронів різних шарів, а також, в деяких конфігураціях, і нейронів одного шару між собою, причому обробка взаємодії всіх нейронів ведеться пошарово.

Теоретично кількість шарів і кількість нейронів в кожному шарі може бути довільною, проте фактично вона обмежена ресурсами комп'ютера або спеціалізованої мікросхеми, на яких зазвичай реалізується НМ. Чим складніша НМ, тим масштабніші завдання, що підвладні їй.

Вибір структури НМ здійснюється відповідно до особливостей і складності завдання. Для вирішення деяких окремих типів завдань вже існують оптимальні, на сьогоднішній день, конфігурації. Якщо ж завдання не може бути зведене ні до одного з відомих типів, розробникові доводиться вирішувати складну проблему синтезу нової конфігурації. При цьому він керується декількома основоположними принципами: можливості мережі зростають із збільшенням кількості осередків мережі, щільністю зв'язків між ними і кількістю виділених шарів; введення зворотних зв'язків разом із збільшенням можливостей мережі піднімає питання про динамічну стійкість мережі; складність алгоритмів функціонування мережі (зокрема, наприклад, введення

декількох типів синапсів – збудливих, гальмівних тощо) також сприяє посиленню потужності НМ. Питання про необхідні і достатні властивості мережі для вирішення того або іншого роду завдань є цілим напрямком нейрокомп’ютерної науки. Оскільки проблема синтезу НМ дуже залежить від розв’язуваної задачі, дати загальні докладні рекомендації важко. В більшості випадків оптимальний варіант виходить на основі інтуїтивного підбору.

Вочевидь, що процес функціонування НМ, тобто суть дій, які вона здатна виконувати, залежить від величин синапсичних зв'язків, тому, задавшись певною структурою НМ, що відповідає якому-небудь завданню, розробник мережі повинен знайти оптимальні значення всіх змінних вагових коефіцієнтів (деякі синапсичні зв'язки можуть бути постійними).

Цей етап є навчанням НМ, і від того, наскільки якісно він буде виконаний, залежить здатність мережі вирішувати поставлені перед нею проблеми під час експлуатації. На етапі навчання окрім параметра якості підбору вагів важливу роль відіграє час навчання. Як правило, ці два параметри зв'язані зворотною залежністю і їх доводиться вибирати на основі компромісу.

Навчання НМ може вестися з вчителем або без нього. У першому випадку мережі пред'являються значення як вхідних, так і бажаних вихідних сигналів, і вона за деяким внутрішнім алгоритмом підстроює ваги своїх синапсичних зв'язків. У другому випадку виходи НМ формуються самостійно, а ваги змінюються за алгоритмом, що враховує тільки вхідні і похідні від них сигнали.

Існує велика кількість різних алгоритмів навчання, які поділяються на два великі класи: детерміністські і стохастичні. У першому з них підстроювання вагів є жорсткою послідовністю дій, в другому – вона проводиться на основі дій, що підкоряються деякому випадковому процесу.

При класифікації НМ важливо відзначити існування бінарних і аналогових мереж. Перші з них оперують з двійковими сигналами і вихід кожного нейрона може приймати тільки два значення: логічний нуль („загальмований” стан) і логічна одиниця („збуджений” стан). В аналогових

мережах вихідні значення нейронів здатні приймати безперервні значення, що могло б мати місце після заміни в активаційній функції нейронів перцептрона на сигмоїд.

Ще одна класифікація ділить НМ на синхронні і асинхронні. У першому випадку в кожен момент часу свій стан міняє лише один нейрон. У другому – стан міняється відразу у цілої групи нейронів, як правило, у всього шару. Алгоритмічно хід часу в НМ задається ітераційним виконанням однотипних дій над нейронами. Надалі будемо розглядати тільки синхронні НМ.

Мережі також можна класифікувати за кількістю шарів. Тут доречно відзначити важливу роль нелінійності активаційної функції, оскільки, якби вона не мала даної властивості або не входила в алгоритм роботи кожного нейрона, результат функціонування будь-якої p-шарової НМ з ваговими матрицями $W^{(i)}$,i=1,2, ..., p для кожного шару i зводився б до перемножування вхідного вектора сигналів X на матрицю

$$W^{(\Sigma)}=W^{(1)}\cdot W^{(2)}\cdot\ldots\cdot W^{(p)} \tag{3.61}$$

тобто фактично така p-шарова НМ еквівалентна одношаровій НМ з ваговою матрицею єдиного шару $W^{(\Sigma)}$:

$$Y=XW^{(\Sigma)} \tag{3.62}$$

Треба відзначити, що нелінійність іноді вводиться і в синапсичні зв'язки. Більшість відомих на сьогоднішній день НМ використовують для знаходження зваженої суми входів нейрона згідно формули (3.58), проте в деяких випадках НМ корисно ввести інший запис, наприклад:

$$s=\sum_{i=1}^{n}x_i^2\cdot w_i \tag{3.63}$$

або навіть

$$s = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot x_{((i+1) \bmod n)} \cdot w_i \qquad (3.64)$$

Введення такого роду нелінійності збільшує обчислювальну потужність мережі, тобто дозволяє з меншою кількістю нейронів з „нелінійними" синапсами сконструювати НМ, що виконує роботу звичайної НМ з великою кількістю стандартних нейронів і складнішої конфігурації.

Робота всіх нейронних мереж зводиться до класифікації (узагальненню) вхідних сигналів, що належать *n*-вимірному гіперпростору, по деякій кількості класів. З математичної точки зору це відбувається шляхом розбиття гіперпростору гіперплощинами (запис для випадку одношарового перцептрона)

$$\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot w_{ik} = T_k \text{ , } k=1,...,m \qquad (3.65)$$

Кожна отримана область є областю визначення окремого класу. Кількість таких класів для однієї НМ перцептронного типу не перевищує $2m$, де m – кількість виходів мережі. Проте не всі з них можуть бути розділені даною НМ.

Функції, які не реалізуються одношаровою мережею, називаються лінійно нероздільними. Рішення задач, що підпадають під це обмеження, полягає в застосуванні двох і більше шарових мереж або мереж з нелінійними синапсами, проте і тоді існує вірогідність, що коректне розділення деяких вхідних сигналів на класи неможливе.

Алгоритм навчання НМ з вчителем включає наступні етапи.

1. Виконати ініціалізацію елементів вагової матриці (зазвичай невеликими випадковими значеннями).

2. Подати на входи один з вхідних векторів, які мережа повинна навчитися розрізняти, і обчислити її вихід.

3. Якщо вихід правильний, перейти на крок 4. Інакше обчислити різницю між ідеальним і отриманим значеннями виходу:

$$\delta = Y_I - Y$$

та модифікувати ваги відповідно до формули:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \nu \cdot \delta \cdot x_i ,$$

де t і $t+1$ – номери відповідно поточної і наступної ітерацій;

ν – коефіцієнт швидкості навчання, $0<J_1$;

i – номер входу;

j – номер нейрона в шарі.

Вочевидь, якщо $Y_1>Y$ вагові коефіцієнти будуть збільшені то тим самим вони зменшать похибку. Інакше вони будуть зменшені, і Y теж зменшиться, наближаючись до Y_1.

4. Повторити цикл, розпочинаючи з кроку 2, поки мережа не перестане помилятися.

На другому кроці на різних ітераціях по черзі у випадковому порядку пред'являються всі можливі вхідні вектори. На жаль, не можна наперед визначити кількості ітерацій, які потрібно буде виконати, а в деяких випадках і гарантувати повний успіх.

Найбільш доцільним є використання штучних нейронних мереж в задачах технологічної підготовки виробництва з метою прогнозування та моделювання параметрів, класифікації, групування та розпізнавання образів тощо.

Виконано аналіз пакетів програм, що реалізують штучні нейронні мережі. Він показав, що значну гнучкість та функціональність має пакет MatLab. Завдяки достатньо широкому набору архітектур штучних нейронних мереж та видів їх навчання він дозволяє як будувати штучні нейронні мережі з довільною архітектурою, так і використовувати широкий спектр цих архітектур, що представлені функціями програмного пакету, та встановлювати метод їх навчання, які дають можливість вирішувати широке коло задач.

Наряду з цим, серед стандартних програмних систем створення, навчання та використання наявних нейронних мереж для прогнозування, моделювання, класифікації, групування та розпізнавання образів треба виділити систему NeuroSolutions, що має широкий набір різноманітних структур штучних

нейронних мереж, надає рекомендації з їх використання, має зручний інтерфейс користувача та дозволяє отримати текст програми на одній із мов програмування, що реалізує налаштовану штучну нейронну мережу.

З врахуванням наведеного вище вважаємо, що для розв'язання різноманітних технологічних задач доцільно використовувати пакет MatLab та систему NeuroSolutions.

Побудова та використання штучних нейронних мереж пакету MatLab для розв'язання технологічних задач

Штучні нейронні мережі, що були побудовані та навчені за допомогою функцій пакету MatLab, використані для прогнозування технологічних параметрів різноманітних процесів обробки деталей приладів та класифікації конструкційних матеріалів. З цією метою, в залежності від розв'язуваної задачі та початкових даних, вибирались відповідні штучні нейронні мережі та різноманітні методи їх навчання [8].

Прогнозування технологічних параметрів. Узагальнений алгоритм прогнозування за допомогою штучних нейронних мереж модуля NeuralNetworkToolbox пакету Matlab наведено на рис. 3.15.

З метою визначення ефективності використання штучних НМ для прогнозування технологічних параметрів проведені експериментальні дослідження процесу токарної обробки сталі 20 прохідним різцем із вольфрамового твердого сплаву ВК8 При проведенні експерименту оброблювались заготівки діаметром від 22,2 до 26,6 мм, з глибиною різання t, що варіювалась в межах від 0,25 до 0,5 мм. Частота обертання деталі n змінювалася в межах від 400 до 630 об/хв, а подача s – в межах 0,07–0,225 мм/об. При цьому вимірювали складові сили різання Px, Py, Pz та шорсткість обробленої поверхні.

Для розв'язання задачі прогнозування параметрів процесу токарної обробки за даними, що наведені в таблиці 2.7, вибрана штучна нейронна мережа прямого розповсюдження. Навчання ШНМ здійснювалося згідно з алгоритмом зворотного розповсюдження похибки Левенберга-Марквардта. Для

цієї мережі та алгоритмів навчання створені програми прогнозування вихідних параметрів процесу точіння.

В результаті навчання нейронних мереж отримані програми, які налаштовані на визначення вихідних параметрів токарної обробки сталі 20 інструментом із сплаву ВК8. В якості прикладу, який демонструє роботу ШНМ, визначали шорсткість обробленої поверхні й порівнювали отримані значення з експериментальними даними. Для цього з таблиці 3.7 послідовно видаляли досліди за номерами 2, 3, 4 і 5 та виконували навчання відповідних мереж. Після цього здійснювали прогнозування значень шорсткості поверхонь з використанням початкових даних проведених експериментів. Порівняльні значення прогнозованих та дійсних експериментальних значень шорсткості наведено в таблиці 3.8.

Порівняння значень прогнозування шорсткості обробленої поверхні за допомогою налаштованої штучної нейронної мережі та відповідних експериментальних даних показало, що похибка прогнозування знаходиться в межах 7–15%.

Аналогічно виконана побудова, налаштування та навчання штучних нейронних мереж при дослідженні різноманітних параметрів (розмірний знос різального інструменту, знос інструменту по задній грані та шорсткість обробленої поверхні) процесу токарної обробки конструкційних сталей інструментом із твердих сплавів:

- сталі 20 різцем із Т15К6;
- сталі 40Х13 різцем із Т15К6;
- сталі 40Х13 різцем із ВК8;
- сталі 45 різцем із ВК8;
- сталі 45 різцем із Т15К6.

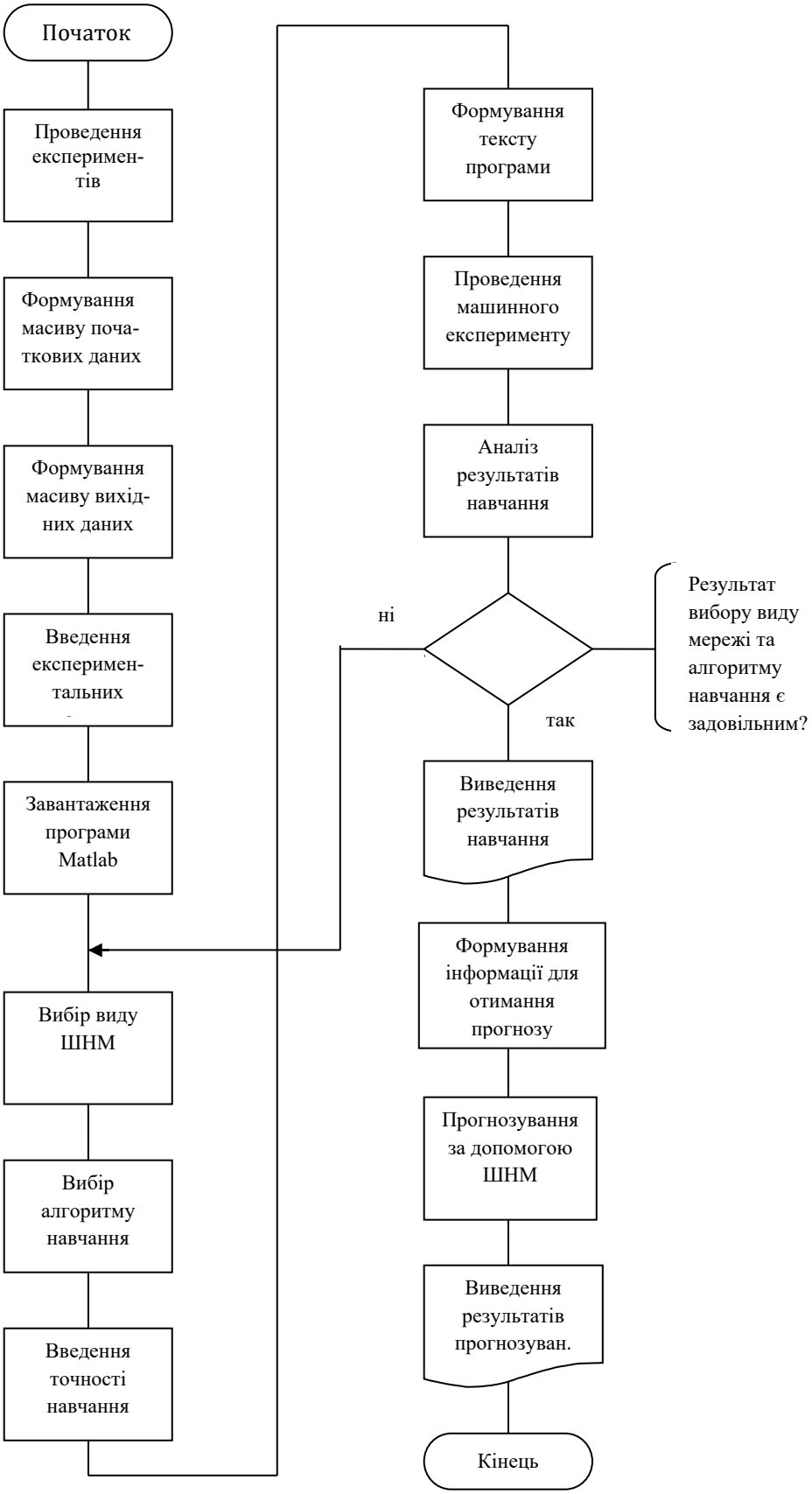


Рис. 3.15. Узагальнений алгоритм прогнозування за допомогою штучних нейронних мереж модуля NeuralNetworkToolbox пакету Matlab.

Таблиця 3.7. **Результати експериментальних досліджень токарної обробки сталі 20 інструментом із твердого сплаву ВК8**

№ досліду	Вхідні дані				Вихідні дані			
	***V*, м/хв**	***s*, мм/хв**	***t*, мм**	**τ, хв**	***Px*, *H***	***Py*, *H***	***Pz*, *H***	***Rz*, мкм**
1	52.6	45	0.35	0.01	120	70	160	10
2	52.6	45	0.35	3.38	130	80	175	10
3	50.44	90	0.5	5.06	260	125	230	22
4	39.25	90	0.25	6.74	130	100	180	30
5	38.3	55	0.4	9.56	220	110	220	20
6	28.9	55	0.25	12.39	140	90	155	40
7	27.9	90	0.5	14.11	420	210	390	50

*Таблиця 3.8.***Порівняльні значення шорсткості обробленої поверхні, що отримані експериментальним шляхом та за допомогою налаштованих нейронних мереж**

№	Швидкість різання *V*, м/хв	Подача *s*, мм/хв	Глибина різання *t*, мм	Час обробки *τ*, хв	Експериментальні значення шорсткості *Rz*	Прогнозовані значення шорсткості *Rz*
2	52.6	45	0.35	3.38	10	11,3
3	50.44	90	0.5	5.06	22	20,5
4	39.25	90	0.25	6.74	30	34,2
5	38.3	55	0.4	9.56	20	18,7

В якості прикладу використання налаштованої штучної мережі для визначення вихідних параметрів процесу точіння сталі 20 прохідним різцем із твердого сплаву ВК8 при довільних значеннях вхідних параметрів в межах проведеного експерименту та навченої штучної НМ виконано відповідні розрахунки. Результати прогнозування наведено в таблиці 3.9.

*Таблиця 3.9.***Результати прогнозування вихідних параметрів процесу точіння сталі *20* інструментом із твердого сплаву ВК8 за довільними початковими даними**

№ досліду	Початкові дані				Вихідні дані			
	***V*, м/хв**	***s*, мм/хв**	***t*, мм**	**τ, хв.**	***Px*, *H***	***Py*, *H***	***Pz*, *H***	***Rz*, мкм**
1	51	45	0,4	0,01	122	77	125	10,02
2	50,1	45	0,35	0,5	129	85	116	12,80
3	39,5	55	0,4	1,2	261	242	187	20,35
4	30	55	0,25	3	131	77	172	24,12
5	28,5	90	0,5	5,05	283	120	286	49,92

З метою визначення ефективності використання ШНМ для прогнозування технологічних параметрів процесу фрезерування плоских поверхонь заготівок із корозостійкої сталі 40Х13 торцевими фрезами з пластинами із твердого сплаву ВК6М без охолодження проведено 30 дослідів, в яких використовувалися торцеві фрези діаметром від 100 до 300 мм, що оснащені пластинами із твердого сплаву ВК6М. При цьому глибина різання *t* варіювалася від 1 до 5 мм, ширина фрезерування *B* – від 70 до 105 мм, а подача *s* - від 145 до 425 мм/хв. Швидкість різання *V* змінювалася від 10,5 до 164 м/хв. В якості вихідного параметру, що характеризує процес різання вимірювалась його потужність *N*, кВт.

Як і при дослідженні процесу токарної обробки, тут в якості базової штучної НМ використано мережу прямого розповсюдження з навчанням зворотного розповсюдження похибок Левенберга-Марквардта.

Для перевірки правильності навчання отриманої нейронної мережі та можливості її використання при прогнозуванні потужності різання експериментальні дані були поділені на дві частини: навчальну та перевірочну. Останню частину склали досліди з номерами 6, 12, 18 та 24. Після навчання мережі за навчальною послідовністю здійснено прогнозування потужності різання за даними в перевірочній послідовності. Результати прогнозування та відповідні їм експериментальні дані наведено в таблиці 3.10.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує, що їх розходження не перевищує 11%.

Виконано також аналогічні дослідження процесів фрезерування плоских поверхонь заготівок із жаростійкої сталі 10Х11Н20ТХР торцевими фрезами з пластинами із сплаву ВК6М.

Виконано прогнозування параметрів процесу свердління отворів в деталях із алюмінієвого сплаву Д8Т свердлами діаметрами 3,3 та 3.8 мм із швидкорізальної сталі Р18. При цьому частота обертання *n* варіювалась від 315 до 500 об/хв, подача *s* – в межах від 26 до 42 мм/хв. В якості вихідних параметрів здійснювали вимірювання величини розмірного зносу свердла *Hsv*,

величини зносу свердла по задній грані *Hz*, похибки обробки *D_Hsv*, осьової сили різання *Po*, моменту кручення *M_kr*. Вхідними даними при проведенні експериментальних досліджень були швидкість різання *V*, подача *s*, глибина *t* та час різання *τ*.

Таблиця 3.10. **Порівняльні значення даних експериментів та результатів прогнозування за допомогою штучної нейронної мережі.**

№ п/п	**Діаметр фрези *D*, мм**	**Глибина різання *t*,мм**	**Ширина фрезерування *B*,мм**	**Подача *s*, мм/хв**	**Швидкість різання *V*, м/хв**	**Реальна потужність різання *N*, кВт**	**Прогнозована потужність різання *Np*,кВт**
6	100	2	70	340	90	4,28	4.2797
12	125	2	85	155	99	3,10	3.3644
18	160	1	110	190	121	1,14	1.2561
24	160	5	110	140	88	5,23	4.6819

Для прогнозування параметрів процесу свердління також була вибрана нейронна мережа прямого розповсюдження з методом навчання, що використовує зворотне розповсюдження похибки Левенберга-Маркардта.

Створено тексти програм, що реалізують дані моделі навчання по кожному із вихідних параметрів.

Перевірка можливості використання даної нейронної мережі для прогнозування параметрів процесу свердління здійснювалася шляхом послідовного вилучення даних експериментів за номерами 2,3,4 та 5, навчання та визначення величини крутильного моменту за допомогою налаштованих штучних нейронних мереж. Порівняльні значення прогнозованого та експериментального значень крутильного моменту наведено в таблиці 3.11.

Порівняння експериментальних та розрахункових даних показало, що дані експериментів та прогнозовані значення є близькими і їх розходження не перевищують 10%.

В якості прикладу використання ШНМ з метою прогнозування крутильного моменту при довільних вхідних значеннях режимів різання виконано відповідні розрахунки. Їх результати наведено в таблиці 3.12.

*Таблиця 3.11.***Порівняння розрахункових та експериментальних значень моменту кручення при свердлінні отворів**

№ п/п	Швидкість різання *V*,м/хв	Подача *s*, мм/хв	Глибина різання *t*, мм	Час обробки *τ*, хв	Експериментальні данні, *M_kr*, Н·м	Розрахункові данні, *M_kr*, Н·м
2	4.4	26	1.65	0.741	6.2	5,85
3	4.4	42	1.65	0.907	11.625	11,24
4	5.5	42	1.65	1.121	4.65	4,73
5	7.6	33	1.65	1.484	7.75	7,01

Таблиця 3.12. **Результати прогнозування крутильного моменту за довільними початковими даними**

Початкові дані				Результати прогнозування
Швидкість різання *V*, м/хв	Подача *s*, мм/хв	Глибина різання, *t*, мм	Час обробки *τ*, хв	Момент кручення *M_kr*, Н·м
3.2	26	1.65	0.440	7,26
4.4	42	1.65	0.580	3,56
4.4	26	1.65	0.620	5,02

Класифікація технологічних об'єктів. Наведемо можливість використання штучних нейронних мереж для розв'язання задачі класифікації. Для цього виконано налаштування нейронної мережі при поділі конструкційних матеріалів на групи.

В якості вхідних параметрів нейронної мережі використано хімічний склад конструкційного матеріалу, а саме: вміст вуглецю *C*, кремнію *Si*, марганцю *Mn*, сірки *S*, фосфору *P*, хрому *Cr*, нікелю *Ni*, молібдену *Mo* та заліза *Fe*. Крім того, на вхід мережі також подавались значення фізико-механічних характеристик матеріалу – зернистість *I,* твердість по Бринелю *HB*, верхня границя плинності R_{eH}, границя плинності під час непропорційного видовження $R_{p0,2}$, границя міцності під час розтягування R_m, істинний опір розриву S_k, відносне звуження під час розірвання *Z*, відносне видовження під час

розірвання *A*. Для навчання мережі на вхід мережі подавався номер групи, до якої відноситься відповідний конструкційний матеріал.

Аналіз різноманітних видів штучних нейронних мереж дозволив встановити, що позитивні результати класифікації дає ймовірнісна мережа. Розроблено тексти програм створення мережі, її навчання та використання з метою класифікації.

Початкові та вихідні дані для використання мережі з метою її налаштування при класифікації наведені в таблиці 3.13.

Тестування цієї мережі за наданими початковими даними показало абсолютно точне співпадання реальних даних та даних класифікації, що отримані за допомогою налаштованої мережі.

Налаштована штучна нейронна мережа також використана для встановлення класифікаційної групи нового конструкційного матеріалу, хімічний склад та фізико-механічні властивості якого наведені в таблиці 3.14.

В результаті класифікації встановлено, що цей матеріал відноситься до групи 3. Правильність результату класифікації підтверджується довідковими даними про цей матеріал.

Наведене розв’язання задач прогнозування технологічних параметрів та класифікації дозволяє зробити такі висновки.

Пакет MatLab за допомогою модуля NeuralNetworkToolbox дає можливість як будувати штучні нейронні мережі з довільною архітектурою, так і використовувати широкий набір цих архітектур, що представлені функціями програмного пакету. Це дозволяє отримати позитивні рішення при розв’язанні практичних задач технологічної підготовки виробництва, а саме – задач прогнозування та класифікації.

За допомогою цього пакету можна виконувати досить гнучке регулювання процесу навчання НМ. Важливим тут є правильний вибір алгоритму навчання мережі для розв’язання поставленої задачі. Це здійснюється за допомогою графічного відображення процесу навчання мережі. У разі, якщо в процесі навчання похибка не зменшується, можна варіювати

такими параметрами, як кількість нейронів в прихованих шарах, кількість епох (циклів проведення змін ваг) та кількість прихованих шарів. Якщо це не призводить до отримання належного результату, то можна змінити алгоритм навчання або вид мережі.

*Таблиця 3.14.***Результати класифікації конструкційного матеріалу**

№	Хімічний склад та фізико-механічні властивості матеріалу																	№
п.п.	*C*	*Si*	*Mn*	*S*	*P*	*Cr*	*Ni*	*Mo*	*Fe*	*I*	*HB*	R_{eH}	$R_{p0,2}$	R_m	S_k	*A*	*Z*	гр
реал	0.18	0.27	0.04	0.026	0.05	0.15	0.13	0.1	98.45	4	143	23.84	25.43	44.21	42.81	25.46	55.31	3
розр																		3

Програмний пакет MatLab також дозволяє реалізувати власні алгоритми навчання нейронних мереж. Це дає можливість задовольнити особливості розв’язання будь-якої задачі, але потребує досконалих знань математичних алгоритмів навчання та внутрішньої мови пакету MatLab.

Аналіз експериментальних даних показав, що для прогнозування технологічних параметрів є ефективним використання мереж прямого розповсюдження з алгоритмами навчання зворотного розповсюдження, зокрема алгоритму Левенберга-Маркардта. В той же час для класифікації конструкційних матеріалів доцільно використовувати ймовірнісні нейронні мережі. В результаті порівняння з іншими структурами штучних НМ та методами їх навчання вони показали більшу збіжність процесу класифікації.

Обробка експериментальних даних за допомогою отриманих програм дозволила налаштувати мережі на прогнозування таких параметрів обробки деталей як: шорсткість обробленої деталі, складові сили різання, розмірний знос інструменту, а також на класифікацію матеріалів за їх хімічним складом та фізико механічними властивостями. Отримані результати дозволяють зробити висновки щодо доцільності використання ШНМ для прогнозування та класифікації технологічних параметрів.

Таблиця 3.13. **Дані хімічного складу та фізико-механічних характеристик та їх класифікаційні групи для навчання мережі з метою класифікації конструкційного матеріалу**

№п.п	Хімічний склад та фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів та відповідні групи																
	C	***Si***	***Mn***	***S***	***P***	***Cr***	***Ni***	***Mo***	***Fe***	***I***	***HB***	R_{eH}	$R_{p0,2}$	R_m	S_k	***A***	***Z***
1	0.55	0.34	0.72	0.03	0.03	0.08	0.15	0.07	98.03	2	207	32	38.9	65.5	71.4	15.2	30.5
2	0.51	0.34	0.73	0.03	0.05	0.07	0.16	0.07	98.04	2	217	30	36.8	68.6	69.3	12.5	19
3	0.24	0.04	0.54	0.02	0.05	0.07	0.16	0.08	98.8	5	143	14	15.9	28.6	36.4	28.1	59.8
4	0.21	0.04	0.54	0.02	0.05	0.05	0.13	0.08	98.91	5	156	15.6	16.6	27.6	35.4	28.1	64
5	0.21	0.03	0.52	0.01	0.05	0.04	0.15	0.09	98.9	5	137	14.9	19.4	29.7	37.8	30.5	60.9
6	0.21	0.03	0.53	0.02	0.05	0.05	0.14	0.15	98.82	5	140	12.7	13.8	26.9	34.1	28.3	64.9
7	0.43	0.29	0.71	0.038	0.07	0.06	0.17	0.7	97.53	3	193	23.51	40.24	53.73	50.36	21.3	31.4
8	0.44	0.26	0.83	0.025	0.06	1.3	0.2	0.12	96.76	4	204	33.2	38.3	65.4	46.7	30.1	34.2
9	0.37	0.32	0.78	0.025	0.06	1.3	0.19	0.11	96.85	4	223	42.54	48.24	78.95	54.82	26.6	26.9
10	0.44	0.29	0.64	0.032	0.05	0.07	0.15	0.9	97.43	3	200	41.63	59.38	84.53	81.06	28.6	18.2
11	0.47	0.29	0.82	0.03	0.1	0.25	0.17	0.7	97.5	3	203	33.51	36.29	63.73	61.36	16.3	40.4
12	0.4	0.29	0.75	0.028	0.012	0.3	0.17	0.11	97.94	2	173	32.46	41.83	64.92	60.24	21.24	34.3
13	0.23	0.28	0.76	0.035	0.07	0.05	0.14	0.13	98.31	3	170	24.85	26.62	43.67	35.15	30.5	58.25
14	0.44	0.3	0.88	0.034	0.11	0.08	0.16	0.12	97.88	4	246	34.24	46.23	71.91	61.64	25.71	30.08
15	0.19	0.3	0.64	0.026	0.011	0.15	0.13	0.1	98.45	4	143	23.84	25.43	44.21	42.81	25.46	55.31

Побудова та використання штучних нейронних мереж системи NeuroSolutions для розв'язання технологічних задач

Система NeuroSolutions увібрала в себе найкращі досягнення в області використання штучних НМ. Графічний інтерфейс користувача системи забезпечує досить потужне та гнучке середовище для створення та реалізації ШНМ. Його інтуїтивність перевищує інтерфейси інших подібних систем, а також він надає можливість швидко та легко будувати різноманітні штучні НМ [8].

Прогнозування технологічних параметрів. Для прогнозування складових сил різання процесу обробки матеріалів різанням використано експериментальні дані, що отримані при токарній обробці заготовки із сталі 40Х різцями з твердосплавною пластиною ВК8 (таблиця 3.15). В цій таблиці введено дані з такими позначеннями: t – глибина різання; n – частота обертів; D – діаметр заготовки; s – подача; Px, Py, Pz – складові сил різання та використано наступні кодування типів різальної крайки: 1 – без покриття; 2 – з дискретним покриттям TiN; 3 – з суцільним покриттям TiN; 4 – з суцільним покриттям TiAlN; 5 – з дискретним покриттям TiAlN; 6 – з дискретним покриттям TiC.

Згідно з методикою використання системи NeuroSolutions спочатку задаються дані для роботи нейронної мережі – матриця вхідних даних мережі та стовпчики вихідної інформації. Після цього вся сукупність дослідів поділяється на три частини: дані для тренування мережі, дані для відновлення та дані для тестування. На основі введених даних вибирається штучна нейронна мережа із множини наявних в системі, яка найбільш точно моделює досліджуваний процес. Для даних, що наведені в таблиці 3.15, найбільш ефективною для прогнозування вибрана штучна НМ моделі RBF, яка реалізує нелінійні ШНМ та містить єдиний (окремий) прихований шар обробки елементів. Цей шар використовує гаусовські активаційні функції, а не звичайні сигмоїдні. Ці мережі мають тенденцію навчатися набагато швидше, ніж інші подібні мережі. Загальний вигляд мережі наведено на рис. 3.16.

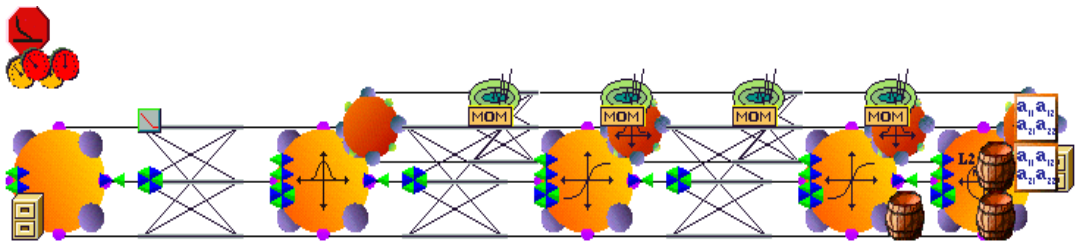


Рис. 3.16 Схема штучної нейронної мережі моделі RBF, що моделює досліджуваний процес.

В таблиці 3.15досліди за номерами 1–10 використані для тренування (навчання) вибраної штучної нейронної мережі, досліди 11–13 – для відновлення та 14–18 – для тестування отриманої мережі.

В таблиці 3.16 наведено порівняльні значення експериментальних даних вихідних величин та прогнозованих, що отримані за допомогою налаштованої мережі. Аналіз отриманих результатів показує, що розходження реальних та прогнозованих значень не перевищує 8%.

Таблиця 3.15. **Результати експериментальних досліджень складових сили різання**

№ п/п	Вхідні параметри					Вихідні параметри		
	Тип покрит.	***t*, мм**	***n*, об/хв**	***D*, мм**	***s*, мм/об**	***Px, H***	***Py, H***	***Pz, H***
1	3	0,1	1600	37,5	0,3	183,9	136,7	151,3
2	4	0,25	1000	37,3	0,6	262,6	280,9	145,7
3	2	0,4	500	36,8	0,3	1023,2	432,4	375,9
4	1	0,1	1000	37,5	0,6	101,8	81,3	67,3
5	5	0,25	500	37,3	0,6	223,7	251,3	131,7
6	6	0,1	1600	36,8	0,3	246,4	70,2	205,5
7	3	0,1	1000	37,5	0,6	166	133	128,1
8	6	0,25	500	37,3	0,6	211	299,3	96,5
9	4	0,4	500	36,8	0,3	823,1	291,9	111,6
10	5	0,4	1000	36,8	0,1	89,1	85	136,7
11	2	0,1	1000	36,8	0,6	119,3	81,3	205,5
12	1	0,4	500	36,8	0,3	95,2	177,4	145,2
13	3	0,4	500	36,8	0,1	71,6	73,9	113,6
14	6	0,4	1000	36,8	0,1	66,8	70,2	119,6
15	4	0,1	1600	37,7	0,1	38,9	33,3	140,7
16	1	0,25	1600	37,3	0,1	71,2	129,3	127,1
17	2	0,25	1600	37,3	0,1	58,1	118,3	78,9
18	5	0,1	1600	36,8	0,3	327,2	85	93

Система NeuroSolutions дозволяє отримати текст програми на одній із алгоритмічних мов (наприклад, C++), що моделює роботу налаштованої штучної мережі.

Аналіз та практика використання штучних нейронних мереж для розв'язання різноманітних технологічних задач (моделювання процесів, прогнозування параметрів, зниження факторного простору та класифікації параметрів) дозволяє зробити наступні висновки.

Порівняльна характеристика пакетів програм та систем показали, що для розв'язання технологічних задач доцільно використовувати модуль NeuralNetworkToolbox пакету MatLab та системуNeuroSolutions.

*Таблиця 3.16.***Порівняльні значення вихідних величин, що отримані в результаті проведеного експерименту, та їх прогнозовані значення**

№ досліду	Експериментальні значення			Прогнозовані значення		
	Px, H	***Py, H***	***Pz, H***	***Px, H***	***Py, H***	***Pz, H***
1	183,9	136,7	151,3	186,6	144,1	156,9
2	262,6	280,9	145,7	255,2	283,6	141,2
3	1023,2	432,4	375,9	1011,5	437,9	368,7
4	101,8	81,3	67,3	98,3	85,7	62,4
5	223,7	251,3	131,7	219,1	257,4	136,2
6	246,4	70,2	205,5	240,3	66,8	211,6
7	166,0	133,0	128,1	161,7	138,8	123,5
8	211,0	299,3	96,5	218,6	291,1	100,2
9	823,1	291,9	111,6	813,6	284,8	103,0
10	89,1	85,0	136,7	94,4	82,3	129,9
11	119,3	81,3	205,5	121,5	86,7	211,6
12	95,2	177,4	145,2	93,9	174,0	152,6
13	71,6	73,9	113,6	77,2	78,1	120,3
14	66,8	70,2	119,6	71,4	77,8	113,2
15	38,9	33,3	140,7	41,2	35,7	144,8
16	71,2	129,3	127,1	66,5	137,2	123,6
17	58,1	118,3	78,9	53,6	122,9	82,0
18	327,2	85,0	93,0	318,4	82,6	97,3

Модуль NeuralNetwork має широкий набір архітектур нейронних мереж та видів їх навчання. Для побудови та налаштування штучних НМ модуль має великий набір стандартних функцій, а також дозволяє створювати власні

структури мереж та алгоритми їх навчання, застосовуючи модулі пакету MatLab.

Створені алгоритм і програми навчання та тренування нейронних мереж за допомогою пакету MatLab дозволяють ефективно розв’язати задачі прогнозування технологічних параметрів і класифікації технологічних об’єктів за результатами фізичного експерименту.

Аналіз експериментальних даних показав, що для прогнозування технологічних параметрів є ефективним використання мереж прямого розповсюдження з алгоритмами навчання зворотного розповсюдження, зокрема алгоритму Левенберга-Маркардта, а для класифікації – доцільно використовувати ймовірнісні штучні НМ. Ці мережі показали кращу збіжність при порівняні їх з іншими архітектурами мереж та методами навчання.

Обробка експериментальних даних за допомогою розроблених програм дозволила налаштувати мережі на прогнозування таких параметрів обробки деталей, як шорсткість оброблюваної деталі, складові сили різання, розмірний знос інструменту, а також на класифікацію матеріалів за їх хімічним складом. Отримані результати дозволяють зробити висновки щодо доцільності використання ШНМ для прогнозування та класифікації технологічних параметрів.

Система NeuroSolutions має значний набір штучних НМ для прогнозування, моделювання, класифікації, групування та розпізнавання образів. Вибір необхідної мережі та процес її налаштування просто реалізується завдяки наявності зручного інтерфейсу користувача. Перевагою цієї системи є можливість отримання тексту програми на одній із мов програмування, що моделює роботу налаштованої штучної НМ.

Наведені приклади використання системи NeuroSolutions для моделювання досліджуваних процесів, прогнозування технологічних параметрів та розв’язання інших задач дозволяє вибрати найбільш ефективну структуру нейронної мережі та встановити параметри її навчання з метою

отримання необхідних результатів з заданою точністю, а також отримати текст програми, яка моделює роботу налаштованої штучної НМ.

Таким чином, використання методик штучних нейронних мереж для розв'язання різноманітних задач технологічної підготовки виробництва дозволяє значно знизити кількість експериментальних досліджень під час їх проведення, витрати оброблюваного та інструментального матеріалу, а також зменшити енерговитрати на проведення досліджень.

Питання для самоконтролю

1. Які типи математичних моделей використовуються в технологічних системах?
2. Наведіть основні етапи побудови математичної моделі.
3. Що таке адекватність математичної моделі?
4. Вкажіть вимоги, що висуваються до математичних моделей.
5. У чому полягає різниця між детермінованими та стохастичними моделями?
6. Які програмні засоби використовуються для математичного моделювання?
7. Вкажіть фактори, що впливають на точність математичної моделі.
8. Вкажіть мета декомпозиції при моделюванні технологічних систем.
9. Які методи декомпозиції використовуються в інженерних задачах?
10. Що таке ієрархічна структура технологічної системи?
11. Які переваги має декомпозиція складних систем?
12. Яка сутність чисельних методів моделювання?
13. Які задачі розв'язуються чисельними методами?
14. У чому полягає різниця між аналітичними та чисельними методами?
15. Які основні чисельні методи використовуються в приладобудуванні?
16. Вкажіть критерії точності чисельних розрахунків.
17. Які переваги мають чисельні методи?
18. Які програмні пакети використовуються для чисельного аналізу?

19. Які задачі технологічної підготовки виробництва розв’язуються чисельними методами?
20. Вкажіть мету інтерполяції функцій.
21. Надайте основні методи інтерполяції .
22. Надайте поліном за методом Лагранжа.
23. Які особливості інтерполяції методом Ньютона?
24. Що таке сплайн-інтерполяція?
25. Які похибки виникають при інтерполяції?
26. Які переваги та недоліки різних методів інтерполяції?
27. Вкажіть сутність апроксимації функцій?
28. У чому полягає метод найменших квадратів?
29. Яка мета використання методу найменших квадратів?
30. Як оцінюється точність апроксимації?
31. Які переваги і недоліки має метод найменших квадратів?
32. Яка сутність експериментально-статистичних методів моделювання?
33. Яка роль статистичних методів у моделюванні виробничих процесів?
34. Які етапи проведення експериментальних досліджень?
35. Що таке статистична вибірка?
36. Які переваги мають статистичні методи моделювання?
37. Які обмеження експериментально-статистичних методів?
38. Вкажіть сутність планування експерименту.
39. Яка мета планування експерименту?
40. Вкажіть вимого до факторів та рівнів факторів.
41. Які типи планів експерименту існують?
42. Що таке повний факторний експеримент?
43. У чому полягає дробовий факторний експеримент?
44. Які переваги планування експерименту?
45. Вкажіть сутність регресійного аналізу даних.
46. Яка мета регресійного аналізу?
47. Що таке регресійна модель?

48. Які типи регресійних моделей існують?
49. Як оцінюється адекватність регресійної моделі?
50. Що таке коефіцієнт детермінації?
51. Які задачі технологічного прогнозування розв'язуються регресійним аналізом?
52. Надайте сутність теорії подібності.
53. Яка мета аналізу розмірностей?
54. Що таке критерії подібності?
55. Які основні критерії подібності використовуються в приладобудуванні?
56. Наведітьπ-теорему Бекінгема.
57. Які переваги використання методів теорії подібності?
58. Як оцінюється адекватність моделей подібності?
59. Що таке фрактал і фрактальна розмірність?
60. Яка мета фрактального аналізу технологічної інформації?
61. У яких задачах приладобудування застосовується фрактальний аналіз?
62. Які методи визначення фрактальної розмірності існують?
63. Які переваги і недоліки фрактального аналізу?
64. Як фрактальний аналіз використовується для дослідження поверхонь деталей?
65. Наведіть сутність самоорганізації моделей.
66. Вкажіть мету індуктивного моделювання.
67. Які принципи лежать в основі індуктивних методів самоорганізації?
68. Які переваги мають індуктивні методи моделювання?
69. Які критерії відбору моделей використовуються?
70. Що таке метод групового врахування аргументів (МГВА)?
71. Які етапи синтезу моделей методом МГВА?
72. Вкажіть типи задач, що розв'язуються методом МГВА?
73. Наведіть використовувані критерії селекції моделей самоорганізації.
74. Як оцінюється точність моделей МГВА?
75. У чому полягає нечіткий метод групового врахування аргументів?

76. Які переваги нечітких моделей у порівнянні з класичними?
77. Які труднощі виникають при побудові нечітких моделей?
78. Які технологічні параметри можуть прогнозуватися нечітким МГВА?
79. Як оцінюється точність прогнозування методом НМГВА?
80. Які інженерні задачі розв’язуються нечітким МГВА?
81. Що таке штучна нейронна мережа?
82. Наведіть структуру нейронної мережі.
83. Які типи нейронних мереж існують?
84. Що таке навчання нейронної мережі?
85. Які алгоритми навчання використовуються.
86. Які задачі приладобудування розв’язуються за допомогою нейронних мереж?
87. Які сучасні програмні засоби використовуються для нейромережевого моделювання?

РОЗДІЛ 4.
ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

В розділі наведено аналіз методів, що використовуються для розв'язання задачі параметричної оптимізації. Наведено області доцільного використання різноманітних методів оптимізації. Відмічено, що найбільше розповсюдження при розв'язанні технологічних задач отримали методи математичного програмування і, в першу чергу, методи багатовимірного нелінійного програмування. Наведено опис методів опуклого програмування, методу ковзаючого допуску, методів випадкового пошуку та стохастичного програмування, які доцільно використовувати для оптимізації технологічних параметрів.

Однак розв'язання звичайної однокритеріальної задачі оптимізації не завжди відображає функціонування реального технологічного об'єкта. В цьому безсумнівна слабкість і недостатність постановки задачі одноекстремального математичного програмування, що у процесі уточнення повинна стати багатокритеріальною задачею. Задача багатокритеріальної оптимізації узагальнює звичайну задачу оптимізації на випадки, коли кількість критеріїв перевищує один. Багатокритеріальна постановка задачі відрізняється більшою близькістю до реальної задачі і меншою часткою абстракції. Багатокритеріальність є черговим кроком до розв'язання проблем реальних задач типу математичного програмування в технології машинобудування. Тому в даному розділі наведено методику розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації [5, 8, 13, 15, 21,32].

Наряду з описом методів математичного нелінійного програмування в розділі надано алгоритми їх реалізації, а також приклади практичного використання цих методів.

4.1. Метод опуклого нелінійного математичного програмування

Функція цілі (цільова функція) та функції, що визначають обмеження на область допустимих рішень, є в більшості випадків нелінійні відносно вектора оптимізуючих параметрів, тому ця задача є нелінійною багатовимірною задачею математичного програмування.

Не зважаючи на те, що розроблено досить багато методів розв'язання задач нелінійного програмування, універсального методу, подібного симплекс-методу в лінійному програмуванні, в даний час немає. Тому рекомендується для розв'язання задач оптимізації технологічних параметрів відносно універсальний метод опуклого математичного програмування.

В основу методу опуклого нелінійного математичного програмування покладено методи штрафних функцій, які апроксимують початкову нелінійну задачу з обмеженнями

$$min\{f(x)/g_i(x)\geq 0,\ i=1,2,\ldots,n\} \qquad (4.1)$$

послідовністю пов'язаних з нею задач без обмежень

$$min\{F(x) = f(x) + P_k(x)/x \in E^m\},\ k=0,1,2,\ldots, \qquad (4.2)$$

кожна з яких може бути успішно розв'язана за допомогою раніше наведених методів безумовної оптимізації – градієнтного методу, методу найшвидшого спуску, методів Ньютона тощо.

Існують два основних, в своїй основі різних підходи до побудови задач (4.2), а саме до побудови штрафних функцій *P(x).* Це методи зовнішніх штрафних функцій (метод штрафів) та методи внутрішніх штрафних функцій (метод бар'єрів).

В першому випадку штрафи $P_k(x)$ вибираються таким чином, щоб точки X^k зовні допустимої області D послідовно по мірі зростання номера ітерації k ставали більш «невигідними», при цьому $P_k(X)\to 0$ при $k\to\infty$ для всіх $X^k \in D$. В

методі штрафів рекомендують використовувати штрафну функцію такого вигляду:

$$P(X)=\sum_{i=1}^{n}\{\min[g_i(X),0]\}^2, \qquad P_k(X)=\frac{1}{r^k}P(X). \tag{4.3}$$

При використанні методу бар'єрів функції $P_k(x)$ визначаються так, щоб в процесі розв'язання задачі (4.1) вони «відштовхували» від границі області допустимих рішень D точки $X^k \in D$, k=0,1,2,..., які отримані одним із методів безумовної оптимізації. Тут початкова точка X^0 повинна вибиратись із множини $X \in D$. Тоді

$$P_k(X)=r^k P(X)=r^k\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{g_i(X)}, \qquad g_i(X)>0, \qquad i=1,2,...,n \tag{4.4}$$

або $P_k(X)=-r^k P(X)=-r^k\sum_{i=1}^{n}\ln[g_i(X)], \qquad g_i(X)>0, \qquad i=1,2,...,n$.

В процесі розв'язання задачі оптимізації вказаними методами штрафних функцій використовується послідовність параметрів r, що мають такі властивості:

$$r^k>0 \ \forall k, \ r^k> r^{k+1} \text{и} lim_{k\to\infty} r^k= 0.$$

Розпочинаючи з будь якої точки X^k, k = 0,1,2,… шляхом розв'язання задачі безумовної оптимізації можна отримати нову допустиму точку X^{k+1}, що є ближчою до оптимального рішення X^* задачі (4.1). При цьому виробляється послідовність рішень $\{X^k\}_0^\infty$, для якої $\lim\limits_{k\to\infty} X^k = X^*$, де k – номер ітерації.

Методи внутрішніх та зовнішніх штрафних функцій доцільно комбінувати, в результаті чого отримаємо змішаний метод розв'язання задачі опуклого програмування (4.2). В цьому випадку початкова задача оптимізації перетвориться в послідовність задач без обмежень виду:

$$min\{F(x) = f(x) + P'_k(x) + P''_k(x) / x \in E^m\}, \ k=0,1,2,\ldots, \tag{4.5}$$

де $P_k^{'}(x) = \frac{1}{r^k} P^{'}(x) = \frac{1}{r^k} \sum_{i \in I^{'}} \left\{ \min\left[g_i(x), 0 \right] \right\}^2$, $P_k^{''}(x) = r^k P^{'}(x) = r^k \sum_{i \in I^{''}} \left[g_i(x) \right]^{-1}$,

$$I' = \{i \in \{1,2,\ldots,n\} / g_i(x) \leq 0\}, \; I'' = \{i \in \{1,2,\ldots,n\} / g_i(x) > 0\}.$$

4.2. Метод направленого випадкового пошуку з самонавчанням

Метод направленого випадкового пошуку базується на поєднанні методів статистичних випробувань та статистичного градієнту. Він дозволяє розв'язати задачу нелінійного математичного програмування, яка у загальному вигляді може бути сформульована наступним чином: знайти вектор оптимізації $X^* = (x_1, x_2, \ldots x_n)$ в області *D*, що представлена обмеженнями:

$$\varphi_i(X^*) \geq 0, \; j = 1,2,\ldots,m, \; f(X^*) = \sup f(X), \tag{4.6}$$

де $f(X)$і$\varphi_j(X)$ – функції *n*- вимірного вектора, що задовольняє умовам безперервності у всій області зміни змінних x_i.

При розв'язанні задачі оптимізації методом направленого випадкового пошуку з самонавчанням обчислення виконуються в такій послідовності:

1) спочатку визначаються та підготовляються початкові дані:

2) вираховуються допоміжна змінна $r(\Delta)$ та сталі k і H_0;

3) для заданого діапазону зміни змінних x_i визначаються координати початкового вектора x_i^0, середні квадратичні відхилення σ_{0i} та початковий крок в напрямку градієнта $\varepsilon_0 = k \max\{\sigma_{0i}\}$;

4) формується початкове значення вектора $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0)$, якщо значення x_i^0 вираховуються, або $X^0 = X_0^*$, якщо початковий вектор X_0^* задається на початку обчислень;

5) визначаються значення функції, що оптимізується $H^0 = H(X^0)$;

6) у випадку використання режиму „вільного пошуку" визначається послідовність k_1 випадкових векторів X_{k1}^0, де k_1 = 1, 2, ..., l_2 в області *D*, координати яких мають рівномірний розподіл в цій області. Для кожного X_0^{k1}

вираховуються значення оцінки функції якості $H_0^{k1} = H\left(X_0^{k1}\right)$, які порівнюються з H_0, вибирається екстремальне значення $H_0^* = \max\left\{H_0^{k1}; H_0\right\}$ та знаходиться вектор X_0^*, для якого $H_0^* = H\left(X_0^*\right)$. Це значення вектора X використовується в якості початкового. В режимі "підтвердження" ці дії не виконуються;

7) визначається k_2 випадкових векторів X^{k_2}, де $k_2 = 1, 2, ..., l_3$, координати яких мають нормальний закон розподілу з математичним очікуванням x_{i0}^* та середнім квадратичним відхиленням σ_{i0}. Для кожного X^{k_2} вираховується значення функції $H^{k_2} = H\left(X^{k_2}\right)$, знаходиться максимальне значення $H^* = \max\left\{H^{k_2}, H(X_0)\right\}$ серед векторів, що одержані при випадковому пошуку, та визначається вектор X^*, для якого $H^* = H\left(X^*\right)$;

8) вираховуються нормовані компоненти градієнта функції відносно вектораX_0 за формулою:

$$y_i = \left[\sum g_i^2\right]^{-1/2},$$

де g_i – проекції градієнтного напрямку;

9) виконується крок в напрямку градієнта для уточнення рішення, що одержано при випадковому пошуку за формулою $x_i^\Gamma = x_i^* + \varepsilon_0 y_i$, та визначається значення функції $H^\Gamma = H\left(X^\Gamma\right)$;

10) порівнюються значення функції H^* та H^Γ. Якщо $H^* < H^\Gamma$, то знову виконується рух в напрямі градієнта. При цьому на l-му кроці $x_{il}^* = x_{i(l-1)}^*$ та $H_l^* = H(x_{(l-1)}^*)$. Якщо $H^* > H^\Gamma$, то $H^0 = H(X^*)$ і повторюються обчислення до тих пір, поки не вичерпується зовнішній цикл випадкового пошуку та уточнення рішення по градієнту не буде досягнуто;

11) здійснюється зменшення області вибору випадкових векторів та зменшення кроку градієнта. При цьому крок по градієнту на $к$-му циклі звуження області порівнюється з заданою точністю δ отримуваного рішення. Якщо $\varepsilon_{(k-1)} < \delta$, то потрібно перейти до визначення послідовності випадкових

векторів, інакше дисперсія пошуку σ_k та крок в напрямку градієнта ε_k зменшуються згідно формул:

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{k-1}}{2} = \frac{\sigma_0}{2^k} \;\; ; \quad \varepsilon_k = \frac{\varepsilon_{k-1}}{2} = \frac{\varepsilon_0}{2^k}$$

і здійснюється перехід до визначення послідовності випадкових векторів;

12) перевіряється умова закінчення обчислень. Якщо $\Delta H_K < 0$ для всіх $k = 1, 2, ..., N$, то обчислення чергового етапу випадкового пошуку закінчується, а також, якщо список циклу випадкового пошуку вичерпаний, то розрахунки закінчуються й отриманий вектор X вважається оптимальним. Якщо список циклу випадкового пошуку не вичерпаний, то виконується перехід до порівняння значень функцій H^* та H^Γ і обчислення повторюються. У випадку, коли хоча б при одному значенні k величина $H_k > 0$, то виконується зменшення області вибору випадкових векторів та зменшення кроку руху в напрямку градієнта.

Метод оптимізації випадковим пошуком з самонавчанням є досить універсальним, дає можливість розв’язати багато екстремальну задачу параметричної оптимізації, а також знайти розв’язання задачі оптимізації при наявності розривної області допустимих рішень. Але цей метод потребує значно більшого часу для одержання рішення задачі оптимізації у порівнянні з попередньо розглянутими методами.

Наведений алгоритм методу випадкового пошуку програмно реалізовано та апробовано при розв’язанні задач оптимізації режимів різання.

4.3. Метод стохастичного математичного програмування

Задача стохастичного програмування формуються аналогічно звичайній задачі математичного програмування як лінійного, так і нелінійного за винятком того, що деякі із параметрів та змінних, які входять в цільову функцію або в функції, які визначають область допустимих рішень, є випадковими величинами.

Так, в загальній постановці задача нелінійного програмування формулються наступним чином: знайти вектор оптимізуючи змінних $X=(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, який доставляє мінімальне (максимальне) значення цільовій функції $f(X)$, в області допустимих рішень, що задана сукупністю обмежень $g_j(X) \geq b_j$, $j=1,2,\ldots, m$. На відміну від звичайної детермінованої постановки задачі оптимізації в цій задачі деякі змінні та параметри є випадковими величинами.

Для розв'язання такої задачі можна припустити, що всі випадкові змінні незалежні і підкоряються нормальному закону розподілу.

Цільову функцію f, яка є функцією випадкових змінних x_i, можна розкласти в ряд Тейлора в поблизу вектора $\overline{X}$ середніх значень x_i

$$f(x) = f(\overline{x}) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i}\bigg|_{\overline{x}} \cdot (x_i - \overline{x_i}) + \ldots \tag{4.7}$$

Якщо середньоквадратичні відхилення величини x_iмалі, то членами вищого порядку в розкладанні можна знехтувати і тоді

$$f(x) \approx f(\overline{x}) - \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i}\bigg|_{\overline{x}} \cdot \overline{x_i} + \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i}\bigg|_{\overline{x}} \cdot x_i = f_1(\overline{x}) \tag{4.8}$$

Оскільки всі змінні x_i незалежні і підкоряються нормальному закону розподілу, то функція f також нормально розподілена і її середнє значення та дисперсія будуть визначатись як:

$$\overline{f_1} = f(\overline{x}), \quad \sigma_{C_1}^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\bigg|_{\overline{x}} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2 \tag{4.9}$$

При рішенні задачі стохастичної оптимізації можливі два випадки.

1. Будується нова цільова функція у вигляді

$$f_2 = a_1 \cdot \overline{f_1} + a_2 \cdot \sigma_{C_1}, \tag{4.10}$$

де a_1і a_2– додатні сталі, такі, що визначають відносну важливість складових $\overline{f_1}$ і σ_{C_1}.

2. Нова цільова функція приймається аналогічно випадку 1, а до обмежень завдання додається умова $\sigma_{C_1} \le a_3 \cdot \overline{f_1}$, де a_3 – додатна стала.

Оскільки випадкові змінні входять в обмеження задачі, то вони (обмеження) також матимуть імовірнісний характер. В цьому випадку бажано, щоб вірогідність того, що дане обмеження задовольняється, була більше деякої певної величини. Тоді j-те імовірнісне обмеження можна записати таким чином: $P\{g_j(x) \ge b_j\} \ge p_j$.

З урахуванням заміни $y_j = \Phi_{j(x)} = g_j(x)$, j-те обмеження перетвориться до вигляду

$$\int_0^\infty P\left(y_j\right) \cdot dy_j \ge P_j ,$$

де $P(y_j)$– щільність вірогідності випадкової змінної y_j. Розкладаючи функцію $\Phi_j(x)$в ряд в околиці вектора $\overline{X}$ середніх значень x_jі залишаючи тільки лінійні члени, отримаємо

$$y_j = \Phi_j(x) \approx \Phi_j\left(\overline{X}\right) + \sum_i \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}\bigg|_{\overline{X}} \cdot \left(x_i - \overline{x_i}\right), \qquad (4.11)$$

де y_j– нормально розподілена випадкова величина. Її середнє значення та середньоквадратичне відхилення визначаються згідно формул:

$$\overline{y_j} = \Phi_j\left(\overline{X}\right), \quad \sigma_{y_j} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_i}\bigg|_{\overline{X}}\right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2} \qquad (4.12)$$

Шляхом заміни змінною $\theta = \dfrac{y_j - \overline{y_j}}{\sigma_{y_j}}$

і з урахуванням того, що j-те обмеження перетворюється до вигляду

$$\frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\int\limits_{-\left(\frac{\overline{y_j}}{\sigma y_j}\right)}^{\infty} e^{-\frac{\theta}{2}}d\theta \geq \frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\int\limits_{\psi(P_j)}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}}dt, \tag{4.13}$$

де величина $\psi(p_j)$ залежить від рівня довірчої вірогідності p_j. Звідси отримаємо j-те обмеження в наступному вигляді

$$-\frac{\overline{y_j}}{\sigma_{y_j}} \leq \psi\left(p_j\right) \text{ або ж } -y_j - \psi\left(p_j\right)\cdot\sigma_{y_j} \leq 0, \tag{4.14}$$

$$\text{тоді } g_j\left(\overline{X}\right) = \psi\left(p_j\right)\cdot\sqrt{\sum_i\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x_i}\middle|_{\overline{X}}\right)^2\cdot\sigma^2_{x_i}} \geq \overline{b_j}. \tag{4.15}$$

Методика стохастичного програмування програмно реалізована та апробована при розв'язанні технологічних задач.

Наведемо приклад постановки задачі стохастичного програмування на прикладі оптимізації режимів обробки деталі різанням.

У випадку детермінованої постановки задачі всі параметри процесу різання вважаються детермінованими, тобто представляються в математичній моделі своїми математичними очікуваннями, при цьому задача оптимізації формулюється таким чином: визначити вектор X оптимізуючих змінних (швидкість різання V, подачу S, глибину різання t, кути різального інструменту – передній γ, задній α і головний в плані φ), що доставляє мінімальне значення технологічній собівартості C обробки деталей.

$$C = b_n + \frac{\pi\cdot d\cdot l}{10^3\cdot V\cdot S}\cdot i\cdot\left[\alpha_T + \frac{M\left(K_U\right)}{T}\right], \qquad T = \frac{h}{60\cdot V}\cdot e^{K_T} \tag{4.16}$$

Значення оптимізуючих змінних визначаються із області допустимих рішень, яка задається обмеженнями на такі параметри:

а) продуктивність процесу обробки $П \geq П_{тр}$;

б) точність обробки $\Delta \le \delta$;

в) якість поверхневого шару:

г) шорсткість обробленої поверхні $Ra \le Ra_{mp}$ або $Rz \le Rz_{mp}$;

д) глибина наклепаного шару $h_c \le h_{cdon}$;

е) залишкові напруги $\sigma_{ост} \le \sigma_{ост.\,д}$;

ж) пружний стан в різальному інструменті $\sigma_\eta \le [\sigma_{-в}]; \sigma_{rm} \le [\sigma_в]$;

з) втомну (циклічну) міцність інструменту $T_{пр} \ge m_1 \cdot T$.

Крім того, параметри процесу обробки (шуканий вектор) повинні забезпечувати стійке різання, тобто $r_1 \le \mathrm{R} \le r_2$, та бути в межах можливостей металорізального верстата, на якому проводиться обробка деталей. Крім цих обмежень на процес різання можуть бути накладені інші, які враховують специфіку конкретних умов обробки.

Оскільки механічні характеристики оброблюваного і інструментального матеріалів є випадковими параметрами, то стійкість і міцність різального інструменту, а також пов'язані з ними інші параметри процесу носитимуть випадковий характер. З урахуванням цього можна сформулювати стохастичну задачу оптимізації технологічних параметрів процесу різання, яка в еквівалентній детермінованій формі полягає у визначенні вектора X оптимізуючих змінних, що доставляє найменше значення цільової функції

$$C_2 = a_1 \cdot C\left(\overline{X}\right) - a_2 \cdot \sqrt{\left(\left.\frac{\partial C}{\partial T}\right|_{\overline{T}} \cdot \sigma_T\right)^2 + \left(\left.\frac{\partial C}{\partial M(K_u)}\right|_{M(K_u)} \cdot \sigma_{M(K_u)}\right)} \qquad (4.17)$$

при імовірнісних обмеженнях з довірчою ймовірністю:

– за продуктивністю обробки

$$П(X) + \psi(P_j) \cdot \left.\frac{\partial П}{\partial T}\right|_{\overline{T}} \cdot \sigma_T \ge П_{т\,р};$$

– за пружним станом в різальному клині інструменту

$$\sigma_\eta - \psi(P_j)\cdot\frac{\partial\sigma_\eta}{\partial\sigma_i}\Big|_{\overline{\sigma_i}}\cdot\sigma_\sigma \le \frac{\sigma_{-\text{‰}}}{n_{-\text{‰}}};\qquad \sigma_{rm} - \psi(P_j)\cdot\frac{\partial\sigma_{rm}}{\partial\sigma_{\text{‰}u}}\Big|_{\overline{\sigma_{\text{‰}}}}\cdot\sigma_{\sigma_1} \le \frac{\sigma_{\text{‰}u}}{n_{\text{‰}}};$$

– за втомною міцністю різального інструменту

$$T_{\text{р}} + \psi(P_j)\cdot\frac{\partial T_{\text{р}}}{\partial N}\Big|_{\overline{N}}\cdot\sigma_{NN} \ge \left[T - \psi(P_j)\cdot\sigma_T\right]\cdot m_1;$$

– за точністю обробки

$$\Delta - \psi(P_j)\cdot\left[\left(\frac{\partial\Delta}{\partial P_x}\Big|_{\overline{P_x}}\cdot\sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial\Delta}{\partial P_y}\Big|_{\overline{P_y}}\cdot\sigma_y\right)^2 + \left(\frac{\partial\Delta}{\partial P_z}\Big|_{\overline{P_z}}\cdot\sigma_z\right)^2\right]^{1/2} \le \delta \qquad (4.18)$$

– за стійкістю процесу різання:

а) $$\frac{P_0}{S\cdot tg\varphi} + \psi(P_j)\cdot\left[\left(\frac{\partial R}{\partial P_x}\Big|_{\overline{P_x}}\cdot\sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_y}\Big|_{\overline{P_y}}\cdot\sigma_y\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_z}\Big|_{\overline{P_z}}\cdot\sigma_z\right)^2\right]^{1/2} \le \delta;$$

б) $$\frac{P(T)}{s\cdot tg\varphi} - \psi(P_j)\cdot\left[\left(\frac{\partial R}{\partial P_x}\Big|_{P_x} - \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_y}\Big|_{P_y} - \sigma_z\right)^2\right]^{1/2} \le r_2;$$

– за ефективною потужністю верстата

$$N_{\text{рез}} - \psi(P_j)\cdot\frac{\partial N_{\text{рез}}}{\partial P_z}\Big|_{P_z} - \sigma_z \le N_{\text{эд}}\cdot\eta\cdot K_n.$$

Обмеження за іншими показниками процесу металообробки аналогічні обмеженням, які прийняті при детермінованій постановці задачі оптимізації.

Використання методів стохастичного програмування для розв'язання задач технологічної підготовки виробництва дозволяє зробити наступні висновки:

1) задача стохастичного програмування дозволяє врахувати в математичній моделі випадкові змінні та параметри, які представлені в моделі математичними очікуваннями та відповідними дисперсіями;

2) представлення задачі стохастичного програмування в вигляді еквівалентної їй детермінованої задачі нелінійного математичного програмування дозволяє застосовувати для її розв'язання один із раніш наведених методів нелінійного математичного програмування.

4.4. Багатокритеріальна оптимізація технологічних параметрів

При розв'язанні багатьох технологічних задач в машино- і приладобудуванні виконуються оптимізаційні розрахунки, де як критерій оптимальності використовується один з вихідних показників досліджуваного процесу (технологічна собівартість, продуктивність процесу, параметри якості обробки тощо). Тоді решта параметрів і показників даного процесу бере участь в цих розрахунках як обмеження. Таким чином, задача оптимізації розглядається як однокритеріальна задача з одним параметром якості, тобто

$$min \text{ (або } max) \, F(X), \quad X \in D \, , \tag{4.19}$$

де $F(X)$ – скалярна цільова функція;

$X=(x_1, x_2, x_3, ..., x_k)$ – вектор оптимізуючих змінних;

D – область допустимих рішень, що задається сукупністю обмежень, які накладаються на розв'язувану задачу.

Проте, часто неможливо вибрати один критерій оптимальності з декількох можливих без втрати якості отримуваного рішення або це робити недоцільно. Тому для аналізу і оцінки процесів, що вивчаються, досить перспективним є застосування багатокритеріальної оптимізації, згідно якої визначається мінімальне (або максимальне) значення комплексної (узагальненої) цільової функції $C(X)$, яка є вектором

$$C(X)= C(f_1(X), f_2(X), ..., f_n(X)) \tag{4.20}$$

де $f_i(X)$– вираз i -го часткового критерію оптимальності, $i=1,2,...,n$;

n – кількість часткових критеріїв, що використовуються при багатокритеріальній оптимізації [8, 15, 21, 41].

Таким чином, задача багатокритеріальної оптимізації узагальнює звичайну задачу оптимізації на випадок, коли $n > 1$, де передбачається, що всі часткові критерії мінімізуються. Тоді задачу багатокритеріальної оптимізації можна записати у вигляді

$$minfi(X),\ i = 1,2,\ \ldots,\ n\ , \qquad (4.21)$$

або у векторній формі $min\ C(X)$.

Якщо деякі з критеріїв треба максимізувати, то для вирішення задачі мінімізації комплексної цільової функції $C(X)$, досить змінити знак відповідної часткової цільової функції на зворотний.

Оптимальне рішення необхідно шукати на множині Парето, яку ще можна представити переговорною множиною або областю компромісу. Ця множина є простором критеріїв $fi(X), i = 1,2,...,n$. Між простором (областю допустимих значень) параметрів $\{X\}$ і простором критеріїв $\{C\}$ є тісний зв'язок. Кожна точка простору параметрів $\{X\}$ відображається в визначену точку $C(X)$простору критеріїв. Для визначення оптимального рішення всередині множини Парето необхідно мати додаткову інформацію у вигляді ранжирування критеріїв.

Нехай всі часткові критерії оптимізації ранжирувані і номер критерію i відповідає номеру рангу. Зазвичай визначення номера рангу проводиться експертним чином шляхом опитування фахівців і подальшою відповідною обробкою їх думок, наприклад, шляхом простого визначення середнього значення по кожному критерію. Тоді оптимізацію треба розпочинати з критерію першого рангу (з найбільшим ваговим значенням), тобто, вирішуючи задачу

$$min\ f_1(X),\ X \in D.$$

Нехай розв’язання даної задачі X_1^* утворюють підмножину допустимих рішень D_1, а потім усередині цієї підмножини потрібно оптимізувати інший критерій

$$min\, f_2(X),\ X \in D_1.$$

Якщо розв'язання цієї задачі X_2^* також утворюють підмножину D_2, то процес багатокритеріальної оптимізації продовжується далі і, таким чином, оптимізується наступний по рангу частковий критерій оптимальності. Проте такий шлях досягнення оптимуму може не привести до правильного рішення задачі, оскільки множина D_i може виродитись в точку. Для того, щоб множина D_i не вироджувалася в точку, необхідно забезпечити деяку свободу у вигляді поступок, які не вимагають мінімізації часткового критерію. Ця ідея поступок полягає в тому, що для всіх часткових критеріїв, окрім останнього, призначаються величини допустимих відхилень від їх мінімальних значень. Величини поступок, як і ранг, для кожного критерію визначаються експертним шляхом, виходячи з особливостей розв'язуваної оптимізаційної задачі. Проте, процес ранжирування часткових критеріїв оптимальності і визначення поступок по кожному з них не завжди простий для експерта, оскільки невдало вибрані поступки можуть привести до необхідності їх корегування.

Таким чином, послідовна оптимізація, починаючи з критерію першого рангу, мало перспективна. Тому досить ефективним є інший підхід – створення комплексного (узагальненого) скалярного критерію

$$C(X)= C(f_1,f_2, ..., f_n), \qquad (4.22)$$

що є функцією початкових часткових критеріїв, причому мінімум цього критерію повинен відповідати розв'язанню багатоекстремальної задачі. Тоді рішення початкової задачі зводиться до рішення звичайної однокритеріальної задачі оптимізації

$$min\, C(X).$$

При цьому функція $C(X)$ повинна задовольняти наступним вимогам:

1) бути інваріантною по відношенню до перетворення зрушення;

2) бути інваріантною до зміни масштабу будь-якого часткового критерію $f_i(X)$;

3) бути інваріантною до перетворення критеріїв у вигляді їх підсумовування.

Ці вимоги задовольняються шляхом представлення комплексної цільової функції у вигляді

$$C(X) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \frac{f_i(X)}{f_{i\min}} \tag{4.23}$$

Для задоволення вимог інваріантності до зміни масштабу часткових критеріїв вводиться новий параметр – максимальне значення критерію f_{imax}. Тоді всім вищенаведеним вимогам відповідає така глобальна цільова функція

$$C(X) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \left(\frac{f_i(X) - f_{i\min}}{f_{i\max} - f_{i\min}}\right), \tag{4.24}$$

де n- кількість часткових критеріїв, що використовуються при багатокритеріальній оптимізації;

α_i – вага i – того критерію;

$f_i(X)$ – вираз i – того критерію оптимальності;

f_{imin}– найменше значення i – того критерію;

f_{imax} – найбільше значення i – го критерію.

Визначення вагових коефіцієнтів α_i зазвичай носить експертний характер і може виконуватися двома способами.

Згідно першого способу визначається частка i – того критерію$f_i(X)$ у комплексному критерії $C(X)$у вигляді часткових оцінок α_i^1, $0 < \alpha_i^1 < 1$, отриманих шляхом опитування експертів, з їх подальшим нормуванням

$$\alpha_i = \frac{\alpha_i^1}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^1}, \; i=1,2,...,n \tag{4.25}$$

Інший спосіб, на думку фахівців, зручніший для експертів і тому є більш практичним. Відповідно до цього способу експерти для кожної з декількох пар ситуацій

$$X_i^1 \text{та } X_i^2,\ i=1,2,...,p$$

ставлять у відповідність один з трьох видів відносин: еквівалентність, перевага і відсутність переваги. В результаті цього отримуємо систему з p рівності та нерівностей щодо невідомих вагів α_i, яку можна представити у вигляді звичайної задачі математичного програмування та розв'язати її відомими методами лінійного або ж нелінійного програмування.

В дослідженнях, де використовувалися два критерії оптимальності - інтенсивність зношування $J(X)$ і коефіцієнт тертя $м(X)$ – при рівності впливу на нову цільову функцію $C(X)$ цих часткових критеріїв, тобто при α_i =1, i = 1, 2, а також з врахуванням граничних значень вихідних параметрів дослідження (інтенсивності зношування і коефіцієнтів тертя) вираз узагальненої цільової функції мав наступний вигляд:

$$C(X) = \left(\frac{J(X) - 0{,}079}{14{,}621} + \frac{\mu(X) - 0{,}055}{0{,}138}\right).$$

Застосування звичних методів оптимізації до глобального (комплексного) критерію з врахуванням заданих граничних значень оптимізуючих параметрів дозволило отримати оптимальні параметри: матеріал покриття, технологічні режими його нанесення (робочий струм, амплітуда коливань), а також умови його експлуатації (швидкість ковзання, питоме навантаження) і рекомендоване змащувальне середовище, які істотно відрізнялися від тих, які отримані при однокритеріальній оптимізації.

Наведемо приклад оптимізації режимів токарної обробки інструментом з покриттям дискретного типу.

При оптимізації параметрів процесу різання критерієм оптимальності може бути один з його вихідних показників (технологічна собівартість,

продуктивність процесу, параметри якості обробленої поверхні тощо). Тоді інші параметри і показники даного процесу враховуються як обмеження.

Однак, часто неможливо вибрати один критерій оптимальності з декількох можливих без втрати якості одержуваного рішення або це робити недоцільно. Тому для аналізу і оцінки процесу різання перспективним є застосування багатокритеріальної оптимізації, відповідно до якої визначається мінімальне (або максимальне) значення комплексної (узагальнюючої) цільової функції *C(X)*, яка визначається за формулою 2.89.

В загальному вигляді частковий критерій – продуктивність процесу механічної обробки різальним інструментом, який враховує витрати на різання, зміну інструменту і налагодження технологічної системи представляли наступним чином:

$$П = \left\{ \tau \left[1 + \frac{t_{зм}}{T} + \frac{m_2 t_{зм}}{T m_1} \right] + t_д \right\}^{-1}, \tag{4.26}$$

де τ – основний час обробки поверхні деталі;

$t_{зм}$ – час на заміну інструмента;

m_2 – кількість змін інструменту внаслідок поломок або викришування;

m_1 – кількість змін інструменту внаслідок його зношування або кількість переточувань;

$t_д$– додатковий час;

T – період стійкості різального інструменту.

Частковий критерій – собівартість процесу механічної обробки різальним інструментом представляли наступним чином:

$$C = b_n + \tau \left[a_T + \frac{m_2}{T} \right], \tag{4.27}$$

де b_n – витрати, які пов’язані з простоєм верстата;

a_T – погодинна заробітна плата.

На основі багатокритеріальної оптимізації визначались режими різання при точінні поверхні деталі із конструкційних сталей 20, 40Х, ШХ15 та ХВГ різальним інструментом із сплаву Т15К6 з вакуум-плазмовими покриттями дискретного типу та швидкорізальної сталі Р6М5 з електроіскровими покриттями ВК8. Для отримання допустимих значень показників комплексного критерію встановлена їх область, яка задана обмеженнями на параметри процесу різання:

– параметри якості поверхні деталі не повинні бути більше величини шорсткості $Ra_{зад}$, встановленої для відповідної поверхні, а саме: $Ra \le Ra_{зад}$, де Ra– шорсткість оброблюваної поверхні, яка визначалась за формулою

$$R_a = (2{,}23351 - 0{,}25009x_1 - 0{,}41903x_2 - 0{,}2549x_3 - 0{,}57639x_4)^2, \qquad (4.28)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 – кодовані значення типу покриття, глибини різання, подачі та швидкості різання відповідно, які визначаються як

$$x_1 = \frac{П - 4}{3},\ x_2 = \frac{t - 0{,}25}{0{,}15},\ x_3 = \frac{s - 0{,}35}{0{,}25},\ x_4 = \frac{V - 123{,}6}{65{,}5};$$

– режими різання (число обертів і подача) мають бути в межах кінематичних можливостей металорізального верстата: $s_{min} \le s \le s_{max}$,; $n_{min} \le n \le n_{max}$, де s_{min}, s_{max}, n_{min}, n_{max}– граничні значення подачі та швидкості різання;

– час роботи інструменту до визначеного критерію зношування має перевищувати період його стійкості – $\frac{h_{max}}{I} \le T$, де h_{max}– максимальне значення розмірного зношування інструменту, а I – швидкість зношування інструменту, яка визначається за формулою

$$I = 4{,}4022 \cdot 10^{-9} \cdot V^{3.,531} s^{-0{,}922} t^{-1{,}4556} \tau^{0{,}0644}, \qquad (4.29)$$

де V – швидкість різання;

s – подача;

t – глибина різання;

τ – час різання.

Для оцінки ефективності процесу металообробки різальним інструментом з покриттям запропоновано комплексний критерій оптимальності – *P(X)*. Характер залежностей часткових критеріїв оптимальності *П* і *С* від швидкості різання *V* наведено на рис.4.1

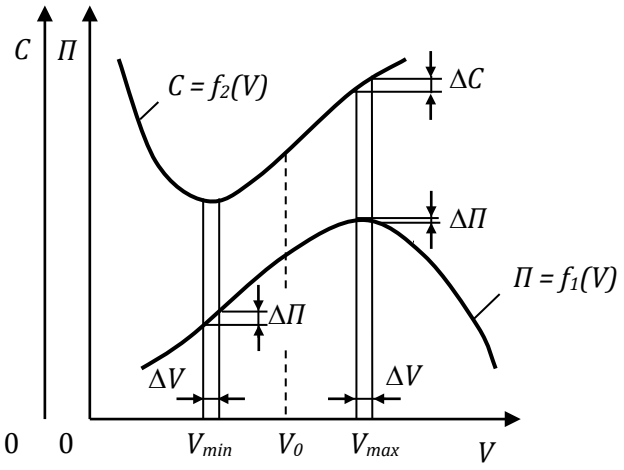


Рис. 4.1. Характер залежностей критеріїв оптимізації *П* і *С* від швидкості різання *V*.

Загальний вигляд комплексного критерію представляли як:

$$\max_{X \in D} P(X) = \max(\alpha_1 \frac{П(X) - П_{\min}}{\Delta П} - \alpha_2 \frac{C(X) - C_{\min}}{\Delta C}), \tag{4.30}$$

де $П_{min}$, C_{min} – мінімальні значення продуктивності та собівартості обробки відповідно, а $\Delta П$ та ΔC – різниці між найбільшими та найменшими значеннями продуктивності та собівартості процесу різання.

Часткові критерії оптимальності – продуктивність процесу різання *П(X)* і технологічна собівартість *С*(*X*)визначали згідно формул 4.26 та 4.27. При рівності впливу на нову цільову функцію *P*(*X*) цих часткових критеріїв, тобто при α_i=1, *i* = 1, 2, а також з урахуванням граничних значень вихідних параметрів процесу різання, вираз комплексної цільової функції мав такий вигляд:

$$max\, P(X) = (\frac{П(X) - 0{,}089945}{0{,}21955} - \frac{C(X) - 0{,}54730}{3{,}28705}) \tag{4.31}$$

Так в результаті розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації встановлено, що при точінні сталі 40Х інструментом із сплаву Т15К6 з покриттям (Ti,Al)N дискретного типу одержали максимальне значення комплексного критерію оптимальності *P(X)*. Цьому значенню відповідають оптимальні режими різання: V = 2,0 м/с та s = 0,2 мм/об, які забезпечують задані параметри якості обробленої поверхні та необхідний період стійкості інструменту.

Застосування комплексного критерію оптимальності з врахуванням заданих граничних значень технологічних параметрів дозволило отримати оптимальні режими процесу різання (швидкість та подачу), які відрізнялися від тих режимів, що відповідають однокритеріальній оптимізації, тому, що вони враховують компроміс між максимальною продуктивністю і мінімальною собівартістю процесу обробки .

В таблиці 4.1. наведені результати розв'язання задач оптимізації режимів токарної обробки конструкційних сталей інструментом з вакуум-плазмовими покриттями дискретного типу.

*Таблиця 4.1***Результати розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації**

Оброблюваний матеріал	**Інструментальний матеріал**		**Оптимальні режими обробки**			**Значення комплексного критерію**
	основа	**покриття**	***V*, м/с**	***s*, мм/об**	***t*, мм**	
Сталь 45	Т15К6	TiN	3,5	0,2	1,0	94
Сталь 45	Т15К6	Ti(C,N)	3,7	0,2	1,0	97
Сталь 45	Т15К6	(Ti,Al)N	3,8	0,2	1,0	102
Сталь 40Х	Т15К6	TiN	2,0	0,15	0,5	72
Сталь 40Х	Т15К6	Ti(C,N)	2,16	0,15	0,5	76
Сталь 40Х	Т15К6	(Ti,Al)N	2,25	0,15	0,5	81
ШХ15	Т15К6	TiN	1,38	0,06	0,3	68
ШХ15	Т15К6	Ti(C,N)	1,46	0,06	0,3	70
ШХ15	Т15К6	(Ti,Al)N	1,58	0,06	0,3	74

Таким чином, рішення задачі багатокритеріальної оптимізації дає можливість отримати комплексну оцінку впливу вхідних (оптимізуючих) змінних досліджуваного процесу на вихідні показники. Крім того, можна

враховувати думку експертів(в вигляді значень вагових показників α) що до впливу кожного часткового критерію оптимізації на комплексний критерій. Методика багатокритеріальної оптимізації є простою, легко реалізується на комп'ютере і, як показало її застосування на практиці, є достатньо ефективною.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть постановку задачі математичного програмування.
2. Які задачі відносяться до задач опуклого програмування?
3. Які основні етапи розв'язання задач нелінійного програмування?
4. У чому полягає різниця між лінійним і нелінійним програмуванням?
5. Які методи використовуються для пошуку оптимального значення функції?
6. Що таке локальний і глобальний оптимум?
7. Що таке цільова функція?
8. Які критерії оптимальності застосовуються при розв'язання інженерних задач?
9. Які переваги має опукле програмування?
10. Які програмні засоби використовуються для нелінійної оптимізації?
11. У яких задачах приладобудування використовується опукле програмування?
12. Які методи градієнтного пошуку застосовуються при оптимізації функцій?
13. Вкажіть умови Куна–Таккера.
14. Як оцінюється збіжність алгоритму оптимізації?
15. Вкажіть сутність методу випадкового пошуку.
16. У чому полягає принцип направленого випадкового пошуку?
17. Які задачі оптимізації розв'язуються методом випадкового пошуку?
18. Які переваги має випадковий пошук у порівнянні з градієнтними методами?

19. Які недоліки методів випадкового пошуку?

20. Як формується напрямок пошуку?

21. Які критерії завершення пошуку використовуються?

22. У чому полягає механізм алгоритму самонавчання?

23. Які задачі приладобудування можна розв’язувати методом випадкового пошуку?

24. Як оцінюється ефективність методу випадкового пошуку при оптимізації функцій?

25. У чому полягає відмінність між випадковим та еволюційним пошуком?

26. Що таке стохастичне математичне програмування?

27. Які задачі оптимізації розв’язуються стохастичними методами?

28. У чому полягає відмінність між детермінованими та стохастичними моделями?

29. Які основні принципи стохастичного програмування?

30. Які переваги має стохастичне програмування?

31. Які методи генерації випадкових величин використовуються?

32. Які задачі приладобудування потребують стохастичної оптимізації?

33. Як оцінюється адекватність стохастичної моделі?

34. У чому полягає метод Монте-Карло?

35. Як оцінюється стійкість оптимального рішення?

36. Які переваги автоматизованих стохастичних систем?

37. Які перспективи використання стохастичних моделей у Industry 4.0?

38. Що таке багатокритеріальна оптимізація?

39. У чому полягає конфлікт критеріїв?

40. Що таке компромісне рішення?

41. Які методи багатокритеріальної оптимізації існують?

42. Що таке множина Парето?

43. У чому полягає принцип оптимальності Парето?

44. Як здійснюється нормалізація критеріїв оптимальності?

45. Що таке вагові коефіцієнти критеріїв?

46. Які переваги має багатокритеріальна оптимізація?

47. Які методи прийняття рішень застосовуються в багатокритеріальній оптимізації?

48. Які задачі приладобудування потребують багатокритеріальної оптимізації?

49. Як оцінюється ефективність оптимального рішення?

50. Яка роль експертних оцінок у виборі критеріїв оптимальності?

51. Які сучасні інформаційні технології застосовуються для багатокритеріальної оптимізації?

РОЗДІЛ 5
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИЛАДІВ

Нагальні вимоги по вдосконалюванню й скороченню строків технологічної підготовки виробництва створили необхідність принципово нового підходу до проектування технологічних процесів (ТП) за допомогою систем автоматизованого проектування. Підвищенню ефективності автоматизованої розробки ТП багато в чому сприяє раціональне сполучення типових і індивідуальних технологічних рішень на всіх стадіях проектування, а також високий рівень стандартизації й уніфікації виробів, устаткування й самих ТП.

При машинному проектуванні технологічних процесів завдання на проектування треба представити у вигляді, зрозумілому для комп'ютера. Процес представлення в такому вигляді є формалізацією даних. Якщо визначена можливість формалізації даних про об`єкти проектування, існує спосіб їх класифікації за геометричними, фізичними та технологічними ознаками. Це, в свою чергу, дозволяє класифікувати й методи їх виробництва.

На цій основі є можливість розробки автоматизованої системи проектування технології виготовлення деталей шляхом переймання, тобто знаходження в базі даних деталі–аналога по сукупності конструктивно-технологічних ознак деталі, на яку розробляється технологічний процес, та подальшого корегування технології її виготовлення з врахуванням особливостей деталі, що підлягає виготовленню.

За умов застосування таких систем значно спрощується та прискорюється робота інженера-технолога над створенням ТП для нової деталі, що запускається у виробництво. Вона зводиться, фактично, до корегування рішення, котре прийме комп'ютеру вигляді рекомендованого ТП-аналога.

Пошук деталі-аналога в базі даних по множині ознак нової деталі доцільно виконувати на основі використання математичних методів класифікації та розпізнавання образів, що наведені в розділі 2.

В цьому випадку якість прийнятого рішення, тобто ступінь наближеності технологічного процесу виготовлення деталі-аналога до розроблюваного ТП, залежить від повноти та обсягу бази даних (БД).

З огляду на все вищенаведене, розробка САПР ТП на основі розпізнання образів має велике значення і перспективу. Тому в даному розділі наводиться методика автоматизованого проектування технологічних процесів механічної обробки деталей приладів, що дозволяє врахувати специфіку приладобудівного виробництва, а також дозволяє прискорити процес проектування. Крім того, тут представлена методика представлення формалізованої моделі деталі, яка забезпечує повний та адекватний її опис, в достатній мірі враховуючи її технологічні та конструктивні особливості, а також можливість її класифікації з великою долею вірогідності.

Аналіз літературних джерел показав, що велика кількість наукових праць присвячена питанням автоматизованого проектування технологічних процесів механообробки та методам класифікації і формалізованого опису оброблюваної деталі, які використовуються при автоматизованому проектуванні технології [6, 7, 8, 22]. Але в цих роботах недостатньо використовуються сучасні математичні методи, зокрема багатовимірного статистичного аналізу – методи класифікації та розпізнання образів.

5.1. Розробка інформаційної моделі деталі

5.1.1. Аналіз інформаційних зв’язків у системах технологічного проектування

Інформація є найважливішим ресурсом будь-якої системи, діяльність котрої пов’язана з обґрунтованим прийняттям рішень. В першому наближенні – при розгляданні системи проектування як „чорної скриньки” – обмін

інформацією з навколишнім середовищем ведеться при отриманні завдання на проектування та при видачі готового результату. Значно рідше відбувається корегування та доповнення бази даних системи.

В свою чергу кожна проектна операція характеризується наступними атрибутами:

1) початкові дані, необхідні для виконання операції;

2) похідні проміжні дані, що отримані в результаті виконання попередніх операцій;

3) інформація з бази даних системи;

4) проектне рішення, отримане в результаті виконання операції на основі відомих і заданих зв'язків і відношень між початковими даними і можливими рішеннями.

При детальному розгляді системи проектування технологічних процесів та виділенні її складових за функціональним призначенням можна зазначити інформаційні зв'язки, що наведено на рис. 5.1.

У процесі проектування інформація, розпочинаючи із завдання на проектування, послідовно проходить через усі підсистеми, після чого на виході отримуємо готове проектне рішення. Кожна підсистема у процесі свого функціонування звертається до відповідної інформації, що зберігається в базі даних. Крім того в базі даних знаходяться алгоритми обробки інформації, умови вибору варіантів технологічного процесу, операцій, переходів тощо.

Дані, що запозичені з зовнішніх джерел або отримані при виконанні попередніх проектних операцій, формуються за відповідними ознаками в множини або в кортежі, тобто в масиви, які складають вміст бази даних.

Задачею виконання конкретної проектної операції є вибір оптимального за наданим критерієм рішення з множини можливих альтернативних рішень. Таким чином множина можливих рішень формально також може бути представлена у вигляді бази рішень, взаємозв'язаних спільністю областей їх застосування, спільністю проектних задач, які виконуються на їх основі тощо.

Дані про функціональні зв’язки й відношення між початковими даними й рішеннями зберігаються в базі знань системи проектування або інформаційної системи. Характер цих зв’язків може бути найрізноманітнішим, представленим у вигляді явних або неявних функцій, обчислювальних або логічних залежностей, таблиць, експертних оцінок або традиційно встановлених правил і рекомендацій

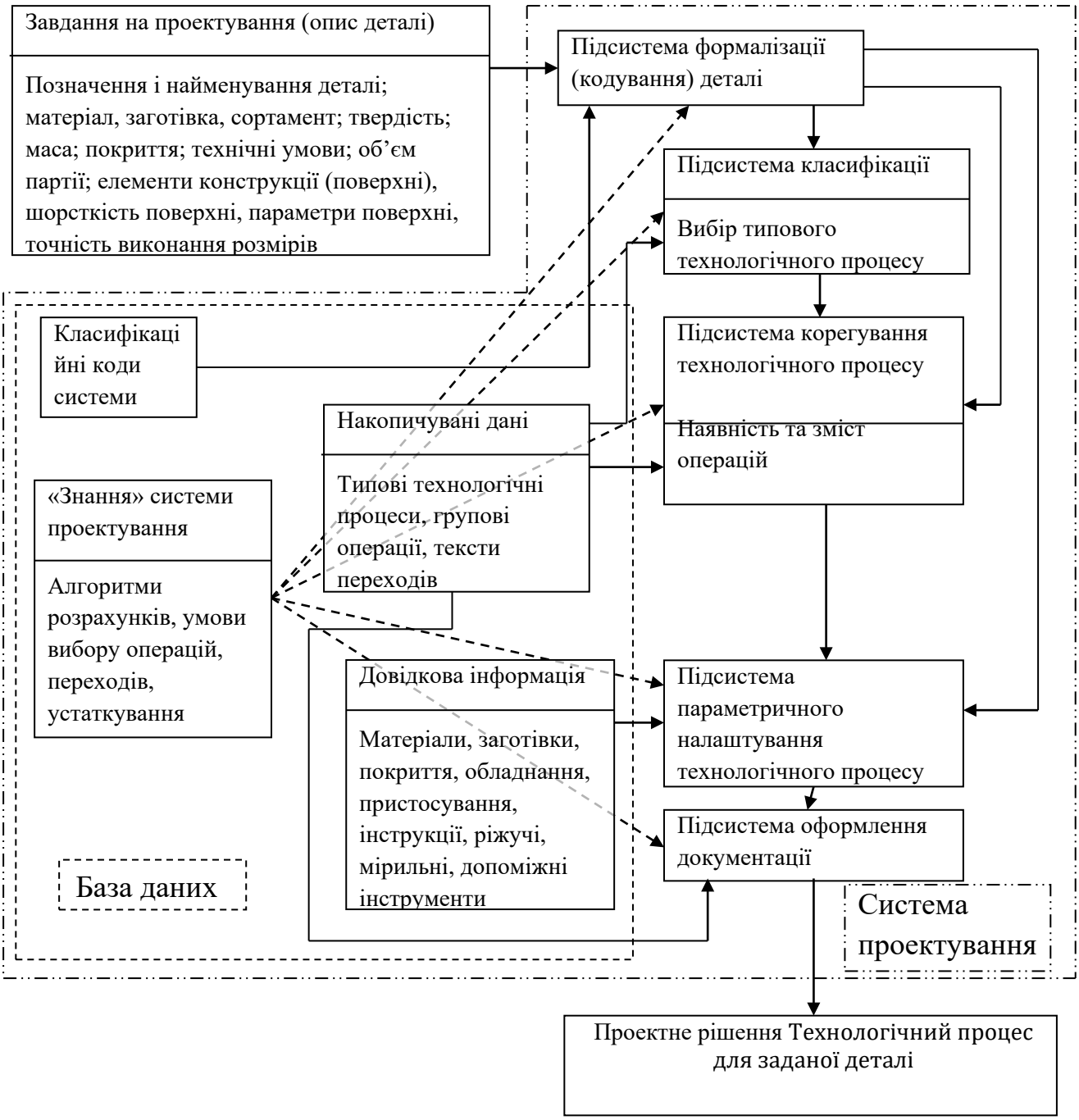


Рис.5.1. Схема інформаційних зв’язків у системах проектування технологічних процесів.

Технологічна підготовка виробництва включає комплекс робіт, що забезпечують найбільш ефективне застосування нових високопродуктивних технологічних процесів з використанням передових досягнень науки і техніки на базі максимальної механізації й автоматизації виробництва. Вони реалізуються в двох основних напрямках:

1) розробка методики, що забезпечує скорочення тривалості і трудомісткості підготовки виробництва;

2) поточна підготовка, яка пов'язана з проектуванням технологічних процесів, їх оснащенням, з розрахунком норм витрат праці, матеріалів, устаткування тощо.

У першому випадку зважуються основні наукові проблеми, що забезпечують проведення корінних змін у виробничому і технологічному процесах підприємства, пов'язаних зі змінами в наукових основах технології. В другому – забезпечується підготовка поточного виробництва, що складається з наступних етапів: технологічна інспекція креслень; розробка технологічних процесів одержання заготівок; механічна, термічна, оздоблювальна обробки; складання складальних одиниць і всього виробу. Усі ці етапи органічно пов'язані з конструюванням оснащення і нестандартних засобів механізації й автоматизації.

Наявна на багатьох заводах індивідуального, дрібносерійного і серійного виробництва практика технологічної підготовки, що базується на розробці і застосуванні індивідуальних технологічних процесів, застаріла, вона не сприяє технічному прогресу. Нераціонально витрачаються великі засоби й сили на проектування технологічних процесів, конструювання і виготовлення оснащення, що в зв'язку з освоєнням нових виробів швидко виявляються непотрібними. Не створюються сприятливі передумови для механізації й автоматизації як самого виробничого процесу, так і робіт з обслуговування і керування виробництвом. Не зважуються основні питання наукової організації праці.

Технологічна класифікація дозволяє в значній мірі скоротити терміни технологічної підготовки виробництва і виконувати її на більш високому організаційно-технічному рівні при менших витратах праці, часу, матеріалів і коштів. Основними напрямками технологічної класифікації, що знайшли широке застосування, є типізація технологічних процесів і груповий метод обробки деталей. Ці напрямки самостійні, але в поєднанні вони дають можливість успішно розв’язувати загальну задачу уніфікації технологічних процесів та оснащення. Технологічні процеси, що розробляються на основі типізації ТП механічної обробки деталей, застосовуються головним чином у крупносерійному та масовому виробництві. Груповий метод обробки отримав поширення в умовах індивідуального, дрібносерійного і серійного виробництва, що є характерним для приладобудування.

Класифікація визначає високопродуктивні методи виготовлення з використанням швидко переналагоджуваних засобів виробництва. При цьому забезпечується економічна ефективність технологічного процесу, скорочення термінів його підготовки і переналагодження на виготовлення нових деталей.

Розробка основ автоматизації проектування технології виготовлення деталей базується на класифікації деталей, їх конструктивних елементів тощо. При цьому велику увагу треба приділяти питанням організації виробництва, тому що тільки при комплексному розв’язанні цих задач може бути істотно знижена собівартість продукції, прискорена оборотність коштів тощо. Технологічна уніфікація сприяє раціональній організації виробництва: впровадженню потокових методів, створенню замкнутих ділянок і автоматичних ліній, кооперуванню і спеціалізації. Вона дозволяє різко скоротити різного роду допоміжні роботи, що пов'язані з оформленням технологічного, планового, облікового й іншого видів документації, необхідної для підготовки виробничого процесу й керування ним. Вона відкриває широкі можливості для застосування обчислювальної техніки, яку можна використовувати при розв’язанні як технологічних задач (класифікації деталей, виборі оптимальної конструкції оснащення, оптимального варіанта

технологічного процесу тощо), так і задач в області нормування, облікових, планових та інших робіт.

Технологічна уніфікація виробів дозволяє (після узагальнення накопиченого досвіду) створювати не тільки типові чи групові, але і стандартизовані технологічні процеси. Це забезпечить у багатьох випадках, особливо в умовах спеціалізації окремих виробництв, обробку деталей і складальних одиниць методами вже розробленої технології, визначити типаж і напрямки в створенні нового обладнання та уніфікованого технологічного оснащення.

Для створення стандартизованих операцій необхідно насамперед класифікувати деталі та їхні елементарні поверхні за видами обробки і вибрати вид устаткування і технологічного оснащення. Потім для обробки подібних технологічних поверхонь, отриманих у результаті класифікації, можна створити стандарти на операції. В залежності від форми й кількості оброблюваних елементів, їхньої точності і чистоти розрізняють одно перехідні й багатоперехідні операції. Перехід є неподільною складовою технологічного процесу та елементарним об'єктом стандартизації. Структура стандартного переходу залежить від конструктивно-технологічних параметрів, що характеризують елементарний процес обробки, і функціональних зв'язків між ними.

З метою визначення змісту і структури технологічного переходу необхідно розглянути всю сукупність конструктивних і технологічних параметрів і встановити методику їхньої класифікації. Наприклад, параметри, що визначають стандартизовану технологію, можна розділити на дві категорії: вихідні (конструктивні) і технологічні. Вихідними є форма і розміри оброблюваних подібних поверхонь, їхня точність розмірів і чистота, механічні властивості оброблюваного матеріалу.

Вихідні параметри поділяють на головні й додаткові. До головних параметрів відносять конструктивні елементи технологічної поверхні, що безпосередньо визначають структуру переходу: форму, розміри й точність

обробки. До додаткових – механічні властивості оброблюваного матеріалу і шорсткість обробленої поверхні, що впливають на параметри режимів різання і застосовуваний інструмент, але не змінюють схеми обробки.

Технологічними є параметри, що характеризують методи і засоби обробки технологічних поверхонь. Це, наприклад, ескіз деталі з позначенням базових поверхонь і оброблюваних розмірів, устаткування, технологічне оснащення, різальний і мірильний інструменти, припуски і допуски на обробку, режими різання, норми часу на обробку, розряд роботи тощо.

Стандартизація технологічних процесів вимагає проведення наступної підготовчої роботи:

– визначення кількісних залежностей між конструктивними і технологічними параметрами за математичними законами;

– встановлення припусків і допусків на обробку подібних технологічних поверхонь та їх окремих елементів;

– розробки аналітичних методів нормування обробки подібних технологічних поверхонь тощо.

Класифікацію зручно застосовувати для окремих систем і підсистем технологічної підготовки виробництва. Існуючі в даний час САПР ТП використовуються в основному в машинобудуванні з серійним та масовим характерами виробництва для деталей відносно простої форми. Автоматизоване проектування застосовують для основних операцій механічної обробки, вільної ковки, гарячої штамповки та пресування пластмас тощо.

Оскільки деталі є багатовимірними об'єктами, тобто описуються великою кількістю різноманітних властивостей, серед яких немає властивостей, що однозначно характеризують кожну із груп (підгруп), то зазвичай опираються на суб'єктивне уявлення про “подібність” і “розходження”. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки алгоритмів об'єктивної класифікації деталей.

Під об'єктивною класифікацією будемо розуміти таке формальне розбиття деякої сукупності деталей на групи (підгрупи), при якому кожній групі відповідає відособлена група точок у просторі властивостей.

5.1.2. Формалізація опису оброблюваної деталі

Необхідною умовою створення системи автоматизованого проектування є розробка підсистеми формалізації вхідних даних про об`єкт проектування. Процес формалізації опису оброблюваної деталі складний і до кінця не уніфікований. Складність його визначається великою кількістю аналізованих типів деталей і варіантів формалізації, відсутністю алгоритму виділення в деталі елементів, які не істотні для визначення типових форм деталі.

У цей час існує множина алгоритмів реалізації окремих етапів цього процесу, але більшість авторів для зменшення розмірності задачі пропонує здійснювати уніфікацію форм на основі класифікації їх за функціональним призначенням.

Варто мати на увазі, що, якщо деталі, різні за функціональним призначенням, мають близькі конструкторсько-технологічні ознаки, те ці деталі можна розглядати при формалізації спільно.

Пропонується для формалізації основної форми деталей враховувати ознаки, що характеризують структуру деталі. В цілому на даний момент логічно виділити три підходи до процесу формалізації опису пропонованої деталі:

1) з побудовою класифікаційних рядів (або перетворенням простору ознак в одновимірний);

2) без виявлення підмножин з найвищою щільністю розташування деталей в n-вимірному простор;

3) з виявленням підмножин з найвищою технологічною щільністю;

Відповідно до першої методики формалізація ґрунтується на систематизації кодів деталі, тобто на застосуванні класифікаційних рядів, що мають такі властивості:

а) дві деталі, що мають однаковий код k, будуть або однаковими, або будуть мати високу подібність;

б) якщо дані три деталі, у яких коди відповідно k_1, k_2і k_3, при чому $k_1 > k_2$, а $k_2 > k_3$, то перша деталь більше подібна другій деталі, ніж третій;

в) якщо дві деталі мають коди, що відрізняються значенням “молодшої” ознаки, то в ряду вони будуть стояти недалеко одна від одної.

На даних принципах оснований цей найбільш ранній метод, з погляду історії розвитку питання. Однак для автоматизованого проектування достовірного класифікаційного ряду необхідно встановити чітку ієрархію ознак, що не завжди можливо через їх слабкий взаємозв'язок. Тому дану методику важко використовувати при автоматизованому проектуванні.

Друга методика більш прогресивна й може бути реалізована тільки за допомогою комп’ютера. Тут деталі розглядаються в n-вимірному просторі й „близькі” деталі компонуються в групу звичайно швидше, ніж деталі, що знаходяться у цьому “ознаковому” просторі на більшій відстані. Всі дані, що необхідні для формалізації опису деталей, знаходяться у базі даних. Запит на формалізацію здійснюється технологом на підставі результатів аналізу складу виробництва. Якщо запропонована формалізація з наступним групуванням технолога не влаштовує, він створює уточнений пошуковий запит і комп'ютер знаходить нову формалізацію.

Перевага цього методу полягає в тому, що запропоновану задачу можна розв’язувати варіантно, з оцінкою різних варіантів та наступним групуванням за кластерами (таксонами) і вибором оптимального варіанта.

Цей метод має наступні недоліки:

а) ступінь подібності вибраних і групованих деталей, визначається суб'єктивно, тобто цілком залежить від досвіду й знання проектувальником виробничих процесів;

б) для аналізу деталей при наявності їх великого масиву потрібно багато часу.

Третя методика дозволяє в n-вимірному просторі послідовно виділяти підмножину деталей з високою щільністю. Опираючись на ці підмножини,

автоматично або в інтерактивному режимі можна остаточно описати деталь за заздалегідь заданими критеріями.

Встановлено що найбільш прийнятним для вибору підходу до формалізації деталі є сполучення другої та третьої методик, що значно полегшує завдання програмного втілення даної моделі й дозволяє об'єктивно впорядкувати конструкторсько-технологічні критерії, використовувані при побудові моделі.

Дані, що необхідні для проектування технологічного процесу взяті з початкових даних, а саме: із креслення деталі, надходять у вигляді логічних векторів типу:

$$ТП = \{a_1, a_2, a_3,...,a_n\}, \tag{5.1}$$

де a_1, ..., a_n – конкретні логічні значення тих або інших конструктивно-технологічних ознак, а саме: структурних, точнісних і технологічних. Найскладніше описуються геометричні ознаки.

Сукупність відомостей про деталі можна представити у вигляді моделі:

$$<H_y,\ G(Q,U),(S_ф,\ S_р,\ S_б),\ Z_o^{(1)}$$

$$Q_{кт} = \{\ <H_y,\ (S_{фi},\ S_{рi},\ S_{бi}),\ Z_i^{(2)} \quad >\}\ i=1,2,...,n \tag{5.2}$$

$$LKФ_q,Z_q> ,\ ^{(k)}q = 1,2,...,m$$

За допомогою першого співвідношення описуються системні характеристики деталі як цілого: основні конструкторські бази деталі й ступені свободи, які вони фіксують $H_y = \{Б_n б_q\}$, де $Б_n б_q$– деяка функція базових поверхонь, структурний склад деталі $G(Q,U)$, її формалізуючу й розмірну структури $S_ф,\ S_р,\ S_б$, а також загальні відомості про деталі Zo.

Відомо, що формалізація деталі є багаторівневою системою, де на кожному рівні задаються структура й параметри i-того рівня. На останньому рівні k задаються тільки форма $КФ$ і параметр Z_k базових структурних елементів деталі.

При даному підході програмне втілення (автоматизоване проектування) вкрай утруднене через складність одержання навіть емпіричних залежностей між параметрами.

При цьому не зовсім доцільним здається використання при описі своїх моделей таких визначень як „простір” і „топологія”. Відмітимо, що, використовуючи логічні змінні й функції, а також аналізуючи параметри іноді навіть різної природи, не дотримується відома суворість математичних визначень простору й топології.

Існує подібний підхід до формалізації з тією лише різницею, що в пропонується набір функцій, який характеризує той або інший параметр вихідних даних (креслення).

Функції, що, задані за допомогою операторів алгебри логіки й системи кванторів, мають досить громіздкий і абстрактний характер. Цей метод має й ряд позитивних властивостей, головною з яких є наведений спосіб опису деяких середньоарифметичних положень, використовуваних при генерації власне технологічного процесу деталі.

Як прийнятний варіант в даній роботі використано двох етапну формалізацію деталі:

а) на першому етапі – опис конструкції та загальних характеристик деталі;

б) на другому – детальний опис конструктивних елементів та вимог до них.

При цьому автоматизоване створення варіанту технологічного процесу механічної обробки здійснюється в два етапи: розробка маршрутної та розробка операційної технології. На кожному етапі застосовуються подібні класифікаційні ознаки. Але на різних етапах методика класифікації відрізняється та має свою специфіку. При цьому метою класифікації деталі є на першому етапі – визначення переліку та послідовності операцій технологічного процесу, а на другому – змісту кожної операції.

Геометрична форма деталі – найбільш об'єктивна і стабільна ознака для її опису. Вона характеризує безпосередньо деталь незалежно від виконуваних нею функцій. Приймаючі до уваги вищесказане, за основу класифікації, що застосована в розроблюваній методиці, прийнята класифікація, яка запропонована в визначнику деталей загальномашинобудівного застосування та в технологічному класифікаторі деталей в машинобудуванні та приладобудуванні.

5.2. Розробка структурної схеми інформаційної моделі деталі

Автоматизоване проектування технології виготовлення деталі використовує дані, тобто її модель, яка є кодованою інформацією про деталь, що в тій чи іншій мірі відображає її особливості. Така інформація, як і будь-які інші відомості, має певну організацію. Особливо це стосується інформації, призначеної для машинної обробки, та такої, що зберігається на машинних носіях. Від структури інформації, з якою працює комп’ютер, залежить швидкість доступу до даних, швидкість та зручність їх обробки, а отже, швидкодія роботи системи проектування в цілому

Для автоматизованого проектування технології виготовлення деталі її модель повинна містити відомості, що є достатніми для її класифікації до певного типу деталей, розробки технологічного процесу та впровадження його у виробництво.

На основі аналізу літературних джерел визначено ознаки деталі, що повинні входити до інформаційної моделі. Для класифікації за типом модель деталі повинна містити опис її загальної конструкції. Такий опис буде загальним для всіх типів деталей. Для розробки технологічного процесу на основі групування в моделі повинна бути присутня технологічна інформація про точність та шорсткість конструкційних елементів деталі, які обробляються на тій чи іншій операції. Кількість та зміст таких ознак для різних типів буде відрізнятись і залежатиме від конструктивних елементів деталі, а також від операцій у типовому технологічному процесі. Для впровадженні деталі у

виробництво потрібна наявність загальної технологічної інформації про деталь, такої як: матеріал, маса, габаритні розміри тощо. Такі відомості також будуть мати загальний вигляд для всіх деталей.

Для здійснення процесу проектування згідно з запропонованою методикою всі відомості про деталь зручно розмістити в двох векторах: вектор *А* – загальні відомості про деталь, які вказуються на етапі попереднього опису деталі для її класифікації; вектор Б – відомості про конструктивні елементи, які вказуються після класифікації деталі, отже віднесення її до певного типу. Таким чином, структуру інформаційної моделі деталі можна представити схемою, що наведена на рис. 5.2.

При розробці математичної моделі деталі використано не повний склад властивостей, а тільки найбільш істотні для кожної класифікаційної групи. Об'єктивність вибору цих властивостей досягається шляхом комплексного аналізу як державних стандартів, що дають можливість виділити геометричні особливості того або іншого класу (підкласу) деталей, так і фізико-механічних властивостей матеріалу деталі й основних технічних вимог до неї. При цьому використано рекомендації, що викладені в.

Рис. 5.2. Структурна схема інформаційної моделі деталі.

При формалізації опису оброблюваної деталі введено її характеристики та параметри, що представлені конструктивно-технологічними ознаками. В якості

значень ознак використано коди, кількість яких буде визначатися технологічною необхідністю.

Кожна ознака деталі A_i може мати кілька значень:

$$A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \ldots, a_{in}\}, \quad (5.3)$$

де a_{i1} – ідентифікатор певного значення ознаки A_i. Кожна ознака може приймати значення від 00 до 99. Для визначення можливих значень певної ознаки деталі необхідно попередньо її кодувати.

Всі розглянуті нижче ознаки наведено зі своїми позначеннями координат A_i, що дозволить надалі запропонувати класифікаційні вектори деталі в компактному вигляді.

Отже, ознаки деталі мають таке значення:

1) a_1, a_2, a_3, a_4– відповідна цифра конструкторської класифікації;2) a_5 – група матеріалу;3) a_6 – вагова характеристика.; 4) a_7 – характер термічної обробки.;5) a_8 – перший параметр розмірної характеристики;6) a_9 – другий параметр розмірної характеристики;7) a_{10} – третій параметр розмірної характеристики;8) a_{11} – максимальна точність зовнішніх поверхонь;9) a_{12}– максимальна точність внутрішніх поверхонь;10) a_{13} – точність інших поверхонь.;11) a_{14}– мінімальна шорсткість зовнішніх поверхонь;12) a_{15}– мінімальна шорсткість внутрішніх поверхонь;13) a_{16} – шорсткість інших поверхонь;14) a_{17}– наявність та вид різьби;15) a_{18}– наявність та вид пазів;16) a_{19}– наявність та вид вікон; 17) a_{20}– наявність та вид додаткових отворів;18) a_{21} – наявність та вид елементів зубчастого зачеплення;19) a_{22}– наявність та вид уступів; ознака приймає кодові значення; 20) a_{23}– наявність та вид додаткової обробки.

Наведений перелік ознак відображає загальні положення, що є необхідними для віднесення деталей до певної підгрупи класу корпусних деталей. Ознаки a_1 – a_4 відповідають останнім чотирьом цифрам конструкторського коду деталі за загальномашинобудівною класифікацією. Разом з ознаками a_{17} – a_{22} вони відображають геометричні особливості форми

деталей, а ознаки $a_5 - a_{16}$, a_{23} – основні технологічні вимоги до виготовлених деталей.

Складові вектора *Б* визначаються після віднесення деталі до того чи іншого типу.

Наведений перелік конструктивно-технологічних ознак для розглянутого класу деталей є наближеним і, в залежності від типу й умов виробництва, а також вимог до точності одержуваних технологічних рішень, він може бути змінений і доповнений.

На основі розробленої системи класифікації можна створити групи деталей та здійснити пошук деталі-аналога. При цьому необхідно прагнути максимального укрупнення груп деталей, що зберігають типові особливості технології виготовлення деталей розглянутого класу. Це призведе до найбільшого зменшення трудомісткості процесу проектування та перетворення праці інженера-технолога в творчу діяльність, звільнить його від монотонної роботи з пошуку інформації.

5.3. Розробка методу дослідження інформаційної моделі деталі

Під дослідженням моделі розуміється обробка інформації, яку вона в собі містить. У даному випадку розглядається вирішення задачі класифікації, тобто знаходження типового представника, деталі, що є найближчою за своєю конструкцією та параметрами до оброблюваної деталі. Як зазначалося раніше, деталь у системі проектування представляється у вигляді векторів чисел, що можна інтерпретувати як точку в багатовимірному просторі ознак. Виходячи з такого представлення, для знаходження найбільш подібного представника достатньо знайти найближчу точку в ознаковому просторі. Для цього використаємо оцінки міри близькості об’єктів, які застосовуються в методах розпізнавання образів (розділ 2).

При розв’язанні задач проектування технологічних процесів виготовлення деталей приладів використовуються три основні оцінки.

1. Евклідова відстань

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^{l} (x_{in} - x_{jn})^2} ,$$

яку доцільно застосовувати в випадках, коли ознаки x_{in} і x_{jn} однорідні за своїм фізичним змістом, при чому встановлено, що вони однаково важливі при віднесенні об'єкта до того чи іншого класу. Якщо ж відомо про різну важливість ознак, то використовується зважена евклідова відстань .

2. Відстань Хемінга

$$d_{ij} = \sum_{n=1}^{p} \left| x_{in} - x_{jn} \right| .$$

використовується в основному як міра відмінності об'єктів, ознаки яких обмірені в шкалах найменувань і порядку. У випадку дихотомічних ознак відстань Хемінга показує кількість незбіжних ознак у об'єктів.

3. Відстань Махаланобіса між об'єктами

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j) \sum^{-1} (x_i - x_j)^T} .$$

зручна тим, що вона інваріантна по відношенню до лінійних перетворень ознакового простору, тобто будь-яке лінійне перетворення (розтягування, зсув, поворот і т. п.) залишає відстань Махаланобіса між об'єктами незмінною. Цю відстань застосовують у тому випадку, якщо ознаки $x^{(1)}$, $x^{(2)}$, …, $x^{(p)}$значно корельовані між собою, а також якщо ознаки мають різну значимість для класифікації.

В даному випадку порівняння двох об'єктів застосування відстані Махаланобіса, в якій використовується коваріаційна матриця, не представляється можливим. При розгляді відстаней Евкліда й Хемінга в їх геометричній інтерпретації відстань Хемінга є арифметичною сумою різниць координат об'єктів по кожній координаті. Евклідова відстань дорівнює геометричній сумі відстаней між об'єктами по координатам, тобто буквально геометричній відстані в заданій системі координат. В наслідок того, що ознаки

деталей мають різне значення, для класифікації доцільно використовувати зважену евклідову відстань.

Розроблені ознаки формалізації деталі можуть мати різну кількість значень, наприклад максимальне значення ознаки, що характеризує елементи зубчастого зачеплення, – 5, а значення вагової характеристики може досягати 28. Це призводить до неоднорідності ознакового простору й зменшує точність класифікації деталі. Для усунення цієї проблеми проведемо нормалізацію простору ознак. У якості вагових коефіцієнтів використаємо значення:

$$w_k = \frac{1}{n_k},\ k = 1,p, \tag{5.4}$$

де n_k– кількість можливих значень k-ї ознаки, тобто величина шкали k-ї координати. Після нормалізації величини всіх шкал будуть дорівнювати одиниці, також як і максимальна різниця ознак об'єктів. Виключення становлять ознаки a_1 і a_2 як такі, що мають істотне значення для класифікації. Їх розраховуємо за такими формулами:

$$w_1 = \frac{1}{n_1}\cdot 2\ ;\ w_2 = \frac{1}{n_2}\cdot 1.5\ ,\ k = 1,p. \tag{5.5}$$

Наведені принципи побудови інформаційної моделі деталі реалізовані в автоматизованій системі проектування технологічних процесів виготовлення корпусних деталей в приладобудуванні [8].

5.4. Математичне та програмне забезпечення автоматизованої системи проектування технології виготовлення корпусних деталей

Алгоритми автоматизованого технологічного проектування і відповідні їх програмні реалізації на комп'ютері відрізняються значною складністю. Якщо часткові алгоритми містять десятки логічних умов, то загальний алгоритм – тисячі. При цьому різко зростає кількість варіантів рішень, ускладняються програми, утруднюється пошук оптимального рішення. Деякі алгоритми

проектування виявляються практично непридатними через велику складність. Максимально спростити алгоритми й різко скоротити число варіантів рішень дозволяє проектування на основі групування деталей та розпізнання образів. Запропонована система кодування деталей позначається на складності створення алгоритмів. Якщо в системі кодування передбачити вказівки технолога, що заздалегідь визначають деякі технологічні рішення, то, алгоритм проектування значно спрощується. Таку можливість доцільно використовувати, коли машинне рішення якої-небудь задачі виявляється занадто складним, а технолог може вирішити її просто і швидко. Складність алгоритму залежить і від прийнятого способу опису конфігурації виробу. Існують універсальні й окремі спеціалізовані системи кодування штампованих, круглих і некруглих деталей тощо. Спеціалізація систем кодування дозволяє зменшити в 2,5 – 3 рази кількість розрядів, необхідних для представлення даних креслення деталі в комп’ютері. Це веде до спрощення ділянок алгоритму, пов'язаних з переробкою вхідної інформації, а отже, до спрощення загального алгоритму проектування технології.

Однак занадто спеціалізовані системи кодування й алгоритми мають вузьку область застосування і в умовах дрібносерійного виробництва може наступити такий стан, коли різноманіття систем кодування й алгоритмів стане перешкодою для практичної їх реалізації. Тому, відзначаючи загальну тенденцію до спеціалізації систем кодування й алгоритмів, варто постійно мати на увазі можливості використання універсальних систем кодування. Конструктивні елементи відібраних деталей повинні бути характерні для більшості з них, щоб створювані алгоритми охоплювали якнайширшу номенклатуру. Цій задачі служить систематизація конструктивних елементів деталей. Нераціонально враховувати в алгоритмі унікальні й рідко використовувані технологічні ситуації, тому що вони значно ускладнюють алгоритм, не даючи належного ефекту. Тут важливе значення має статистичний аналіз, що встановлює зв'язок між частотою використання визначеної ділянки алгоритму і його складністю. Вочевидь, що для випадків проектування, які

рідко зустрічаються, не слід передбачати складних розрахунків, а досить обмежитися спрощеними й наближеними.

З врахуванням вказаних принципів та запропонованої методики формалізації об’єкта проектування (опису деталі, що виготовляється) розроблено відповідні алгоритми.

На рис. 5.3 наведено схему алгоритму формування узагальненого маршруту виготовлення деталей однієї групи. Згідно з цим алгоритмом спочатку в блоці 1 визначається умова створення нового узагальненого маршруту чи поповнення наявного інформацією про нову деталь, що включається в цю групу.

Математичну модель деталі та методи її класифікації за допомогою евклідової відстані описано раніше в даному розділі.

Процес проектування технології виготовлення типової деталі здійснюється згідно алгоритму, який наведено на рис. 5.4.Згідно з цим алгоритмом після завантаження елементів програми та інформації з баз даних у пам’ять ЕОМ (блок 1) користувач вибирає пункт меню „Проект”. Система пропонує ввести загальні відомості про деталь (блок 2).На даному етапі описуються її конструкція та технологічні особливості та проводиться формалізація. При цьому система контролює обов’язкове заповнення всіх полів. Після опису деталь класифікується (блоки 3–7).

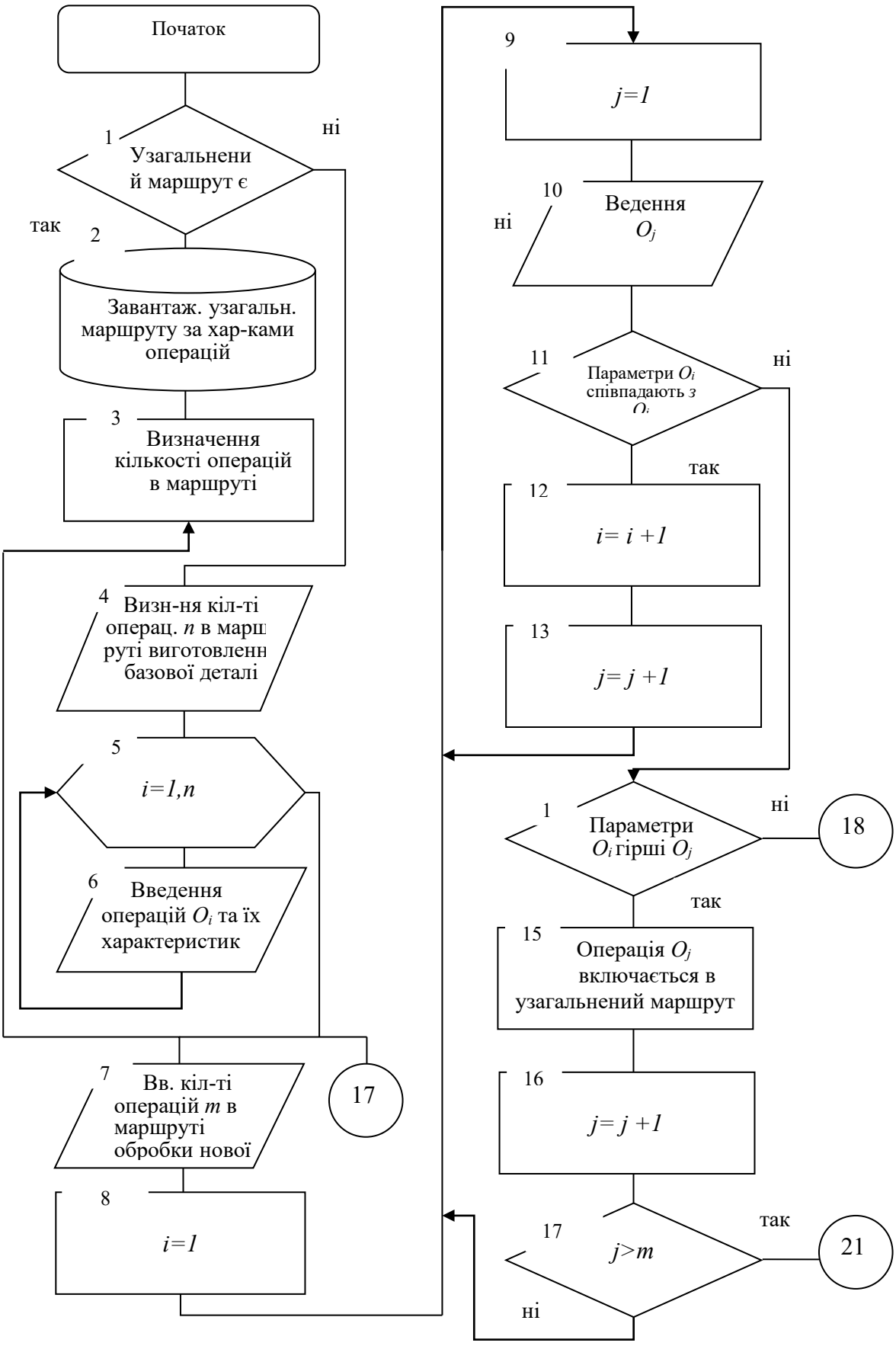
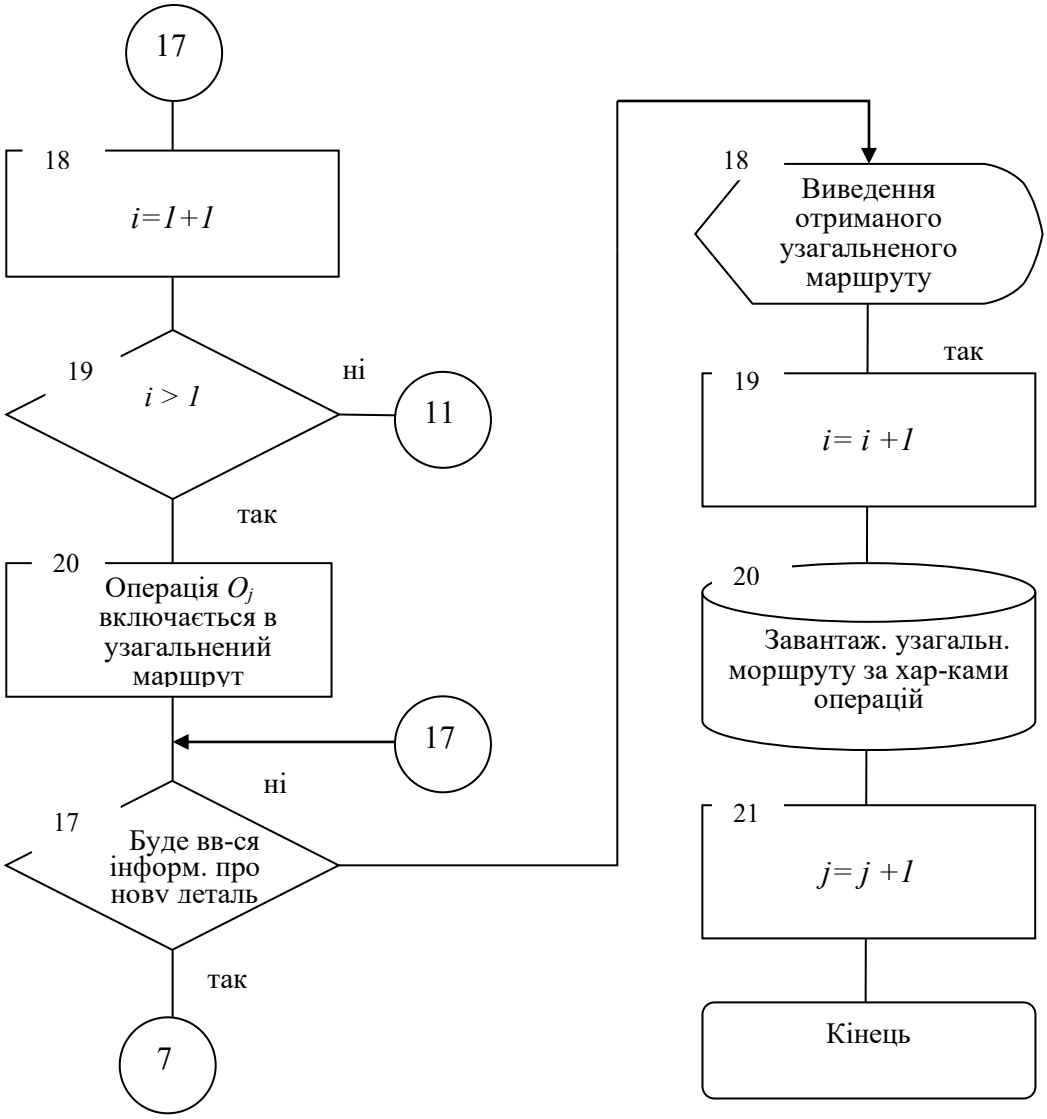


Рис. 5.3.Алгоритм формування узагальненого маршруту обробки деталей однієї класифікаційної групи.



Продовження рис.5.3.

Шляхом послідовного перебору знаходиться найближчий типовий представник до даної деталі, тобто комплексна деталь, зважена евклідова відстань до якої є найменшою. Після віднесення деталі до визначеного типу проектувальнику пропонується набір ознак, які описують конструктивні елементи (блок 8).Наступним етапом, у залежності від опису конструктивних елементів, проводиться автоматичне корегування структури технологічного процесу (блоки 9 – 13).

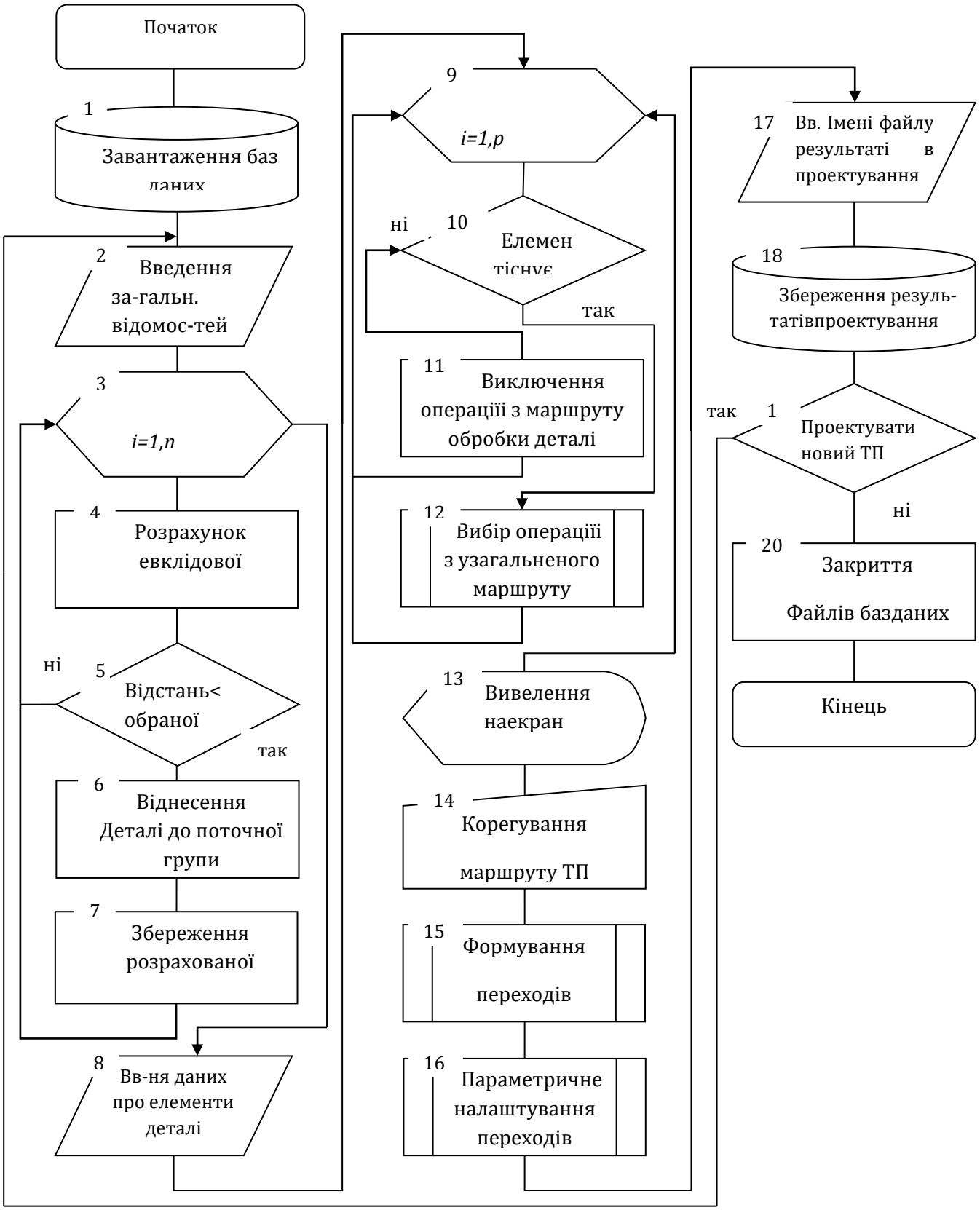


Рис.5.4. Узагальнена схема алгоритму проектування технологічного процесу виготовлення типових деталей.

При описанні конструктивного елементу вказується його наявність (відсутність), у разі наявності зазначається шорсткість та точність виконання елементу. При автоматичному корегуванні в разі відсутності конструктивного елемента відповідні операції його обробки виключаються з маршруту виготовлення деталі (блок 11).Якщо елемент присутній, то визначається точність відповідних операцій: якщо операції з типового технологічного процесу забезпечують виконання конструктивного елементу заданої точності та шорсткості, то вони залишаються незмінними, в протилежному випадку зміст операції корегується (блок 13).

Після цього етапу розроблений варіант технологічного процесу відображається на екрані (блок 14), система дозволяє його ручне корегування (блок 15).Наприкінці здійснюється збереження результатів проектування у вказаний текстовий файл (блоки 16 – 17), після чого можна завершити роботу з системою або розпочати проектування технології виготовлення нової деталі (блок 18).

Наведений на рис. 5.4 алгоритм використовує при проектуванні процедуру вибору операцій із узагальненого маршруту. Алгоритм цієї дії наведено на рис. 5.5.

Програмне забезпечення автоматизованої системи. Запропонована методика проектування технологічних процесів, що представлена в вигляді сукупності алгоритмів, програмно реалізована на мові програмування Delphi. В процесі виконання проектних робіт використовуються інформаційні масиви, що представлені в вигляді таких бібліотечних файлів:

- Constructorcode.dll об’ємом в 1889280 байт, в якому міститься конструкторська класифікація деталі;

- Detals.dll об’ємом в 474732 байти з базою типових технологічних рішень;

- Operations.dll об’ємом в 5212184 байти з переліком можливих операцій, що використовуються при виготовленні корпусних деталей (узагальнений маршрут);

- TechnologCode.dll об’ємом в 5472 байти (технологічна класифікація деталі).

Головна програма проектування , що має ім’я PR_Monitor потребує 534016 байт дискового простору.

Методика автоматизованого проектування маршрутної операційної технології виготовлення корпусних деталей

Послідовність дій при використанні запропонованої системи проектування технологічних маршрутів механічної обробки корпусних деталей представлено в вигляді послідовності інтерфейсних вікон, що наведено на рис. 5.6 – 5.9. Після запуску головної програми на виконання на екрані монітора виникає вікно системи, що пропонує створити новий технологічний процес виготовлення деталі, шляхом вибору з пункту головного меню „Проект” підпункт „Новий”. Після цього здійснюється введення загальних відомостей про деталь та натисканням кнопки „Далі” проектувальнику пропонується ввести конструктивні особливості деталі, що виготовляється, використовуючи пункти меню (рис. 5.6), технологічних. ознак деталі згідно з пунктами меню, що представлено на рис. 5.7 та додаткових відомостей про технологічні параметри деталі (рис 5.8). Після визначення параметрів поточного елемента натисканням кнопки „Наступний елемент” виконується перехід до введення даних про наступний елемент деталі. При необхідності є можливість повернутись до перегляду та корегування раніш введеної інформації шляхом натискання кнопки „Назад”. По закінченні введення всіх параметрів деталі та натискання кнопки „Далі” у вікні, що з’являється на екрані, виводиться розроблений маршрут технологічного процесу (рис. 5.9). Тут кожна операція описується як номер операції її назва та зміст операції (короткий опис переходів). В полі вікна з маршрутом технологічного процесу є можливість його ручного корегування. По закінченню аналізу та корегування отриманого технологічного процесу можна його зберегти шляхом натискання кнопки „Зберегти ”, у вікні, що з’явилось, треба вказавши назву текстового файлу, де

буде представлено технологічний маршрут виготовлення деталі, та адресу його розміщення. Після цього можемо закрити поточний проект, вибравши з пункту меню „Проект ” команду „Закрити проект ”, завершити роботу з програмою проектування, вибравши команду „Вихід”, або розпочати проектування технологічного процесу виготовлення іншої деталі.

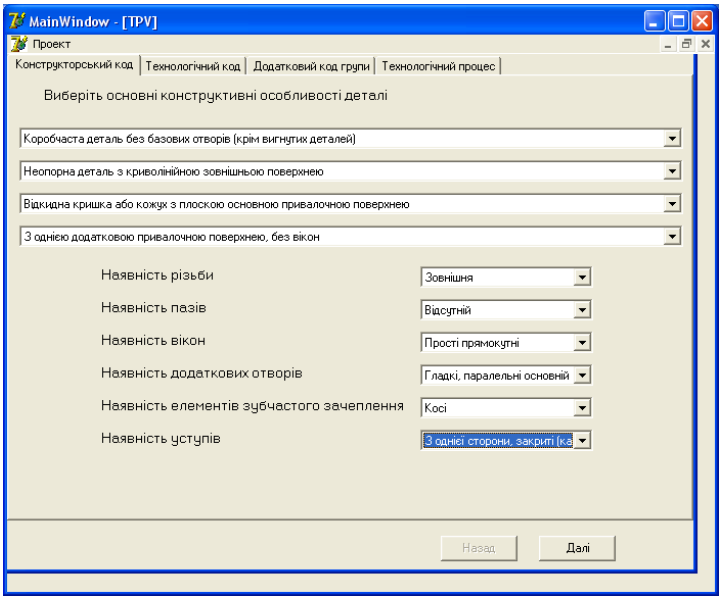


Рис.5.6. Вікно введення конструктивних особливостей оброблюваної деталі.

Системи автоматизованого проектування операційної технології (ОТ) обробки деталей приладів та машин, які на сьогодні пропонує ринок, дуже далекі від основного призначення цих систем.

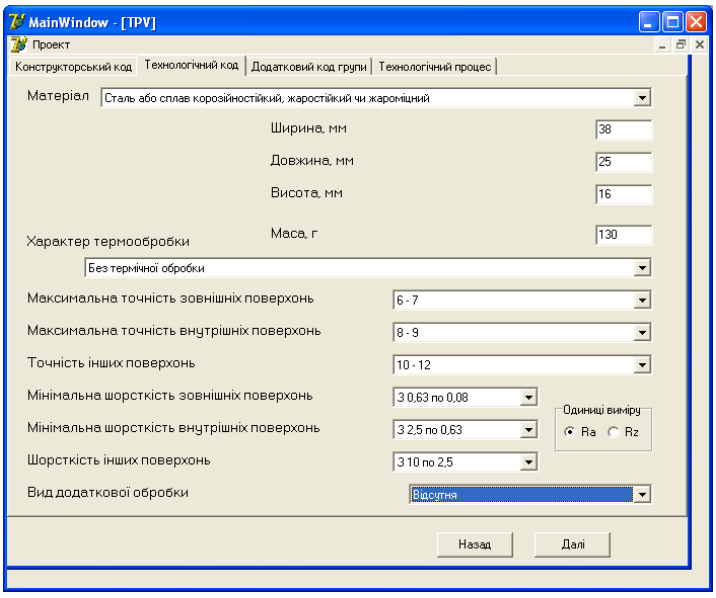


Рис. 5.7. Вікно введення технологічних ознак оброблюваної деталі.

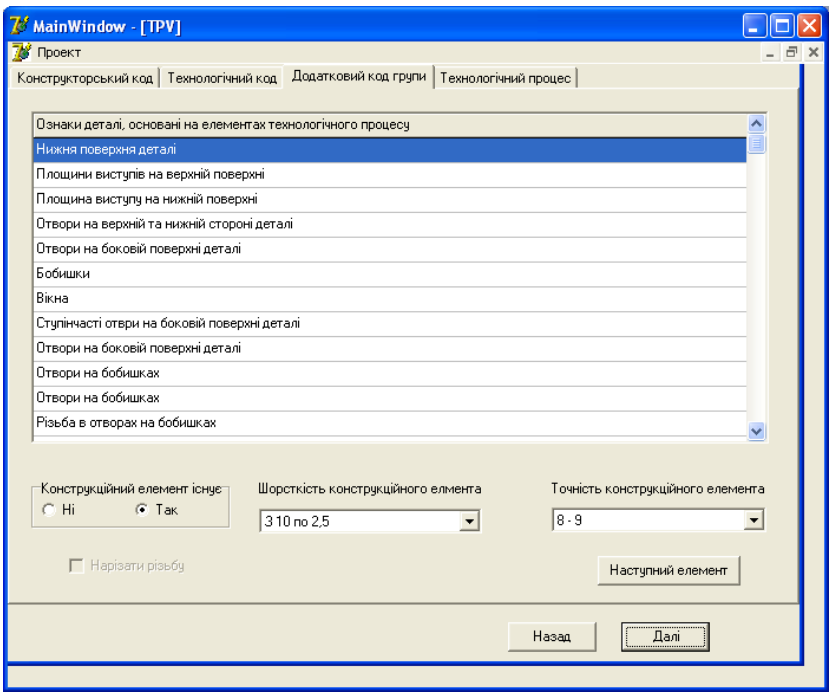


Рис. 5.8. Вікно введення додаткових відомостей про технологічні параметри оброблюваної деталі.

Оскільки ці системи більше подібні за своєю суттю на інформаційно-пошукові системи або системи керування базами даних. При цьому проектувальник проводить пошук, аналіз та вибірку із баз даних потрібної інформації, самостійно приймає всі рішення, а саме: призначення операцій, переходів, інструменту, обладнання тощо. Крім того, розрахунок припусків, між операційних розмірів деталі, режимів різання і технічне нормування практично відсутні. Замість цього користувачу пропонується самому розрахувати вказані параметри або провести часткові розрахунки і ввести їх у систему.

Зрозуміло, що такий підхід до створення САПР ОТ є хибним, мало результативним та вимагає від проектувальника глибоких знань конкретних технологічних процесів, певних вмінь та навичок.

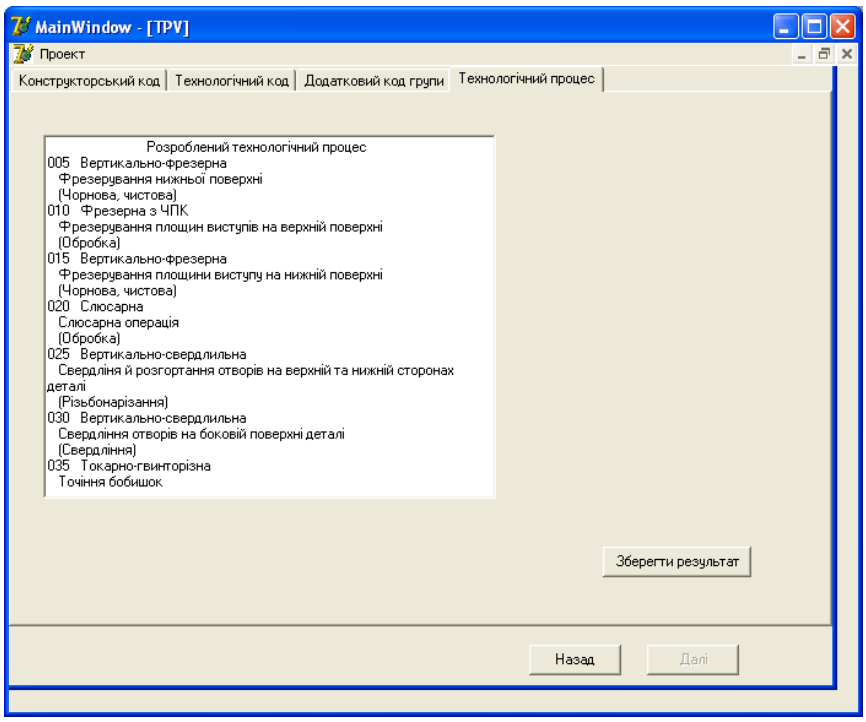


Рис. 5.9. Вікно з технологічним маршрутом виготовлення деталі.

Тому пропонуються методика та алгоритми автоматизації проектування операційної технології, що використовують способи отримання математичних моделей та методи параметричної оптимізації, які наведені в розділах 4 та 5. Створена методика та система автоматизованого проектування операційної технології виготовлення типових деталей приладів та машин, що ґрунтується на використанні принципу структуризації рішень, яка дозволяє скоротити час технологічної підготовки виробництва за рахунок підвищення рівня автоматизації процесу прийняття технологічних рішень і точності їх нормування.

У створеній системі креслення деталі представляється у вигляді набору типових поверхонь. Для кожної із поверхонь визначаються оптимальні параметри її обробки. Робота в системі розпочинається із вибору методу обробки, наприклад, точіння, фрезерування або свердління (рис. 5.11). Після чого здійснюється перехід до першого етапу проектування (рис. 5.12), де вказується матеріал деталі, вибирається вид оброблюваної поверхні та вводяться необхідні параметри заготовки і поверхні.

Після відкриття другого етапу на екрані з’являється відповідне вікно (рис. 5.13), де вже сформований перелік інструментів, які «рекомендує» система, а також їх параметри. Тут проектувальник може уточнити інструмент або залишити перший у списку по-замовчуванню. Інструмент вибирається із бази даних за певним запитом в залежності від методу обробки, матеріалу заготовки, форми поверхні, її характеристик тощо. Наприклад, якщо необхідно вибрати інструмент для токарної обробки циліндричної поверхні із жаростійкої сталі, то система із бази даних інструменту вибере лише прохідні різці із різальною крайкою з відповідного твердого сплаву, геометрія яких буде вибрана в залежності від точності та шорсткості поверхні, що обробляється.

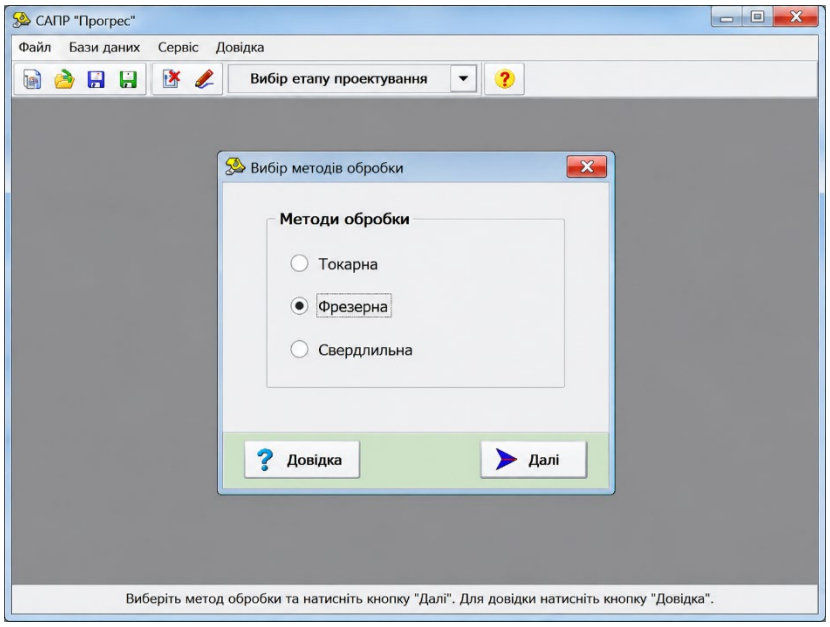


Рис. 5.11. Віконна форма вибору методу обробки.

Наступним етапом проектування є розрахунок режимів різання та норм часу (рис. 5.14). Тут проектувальник вибирає критерій оптимальності й стадію обробки, для якої будуть розраховані оптимальні режими різання. Після натискання відповідної кнопки на екрані з’являються результати розрахунків режимів обробки та норм часу. Для розв’язання задачі оптимізації режимів механічної обробки застосовується метод ковзаючого допуску, який є зручним, швидкодіючим і дає добрі результати розрахунків. В якості цільової функції використовується міра продуктивності або міра собівартості операції, а в якості обмежень, що формують область допустимих рішень задачі оптимізації, –

обмеження за різальними властивостями інструменту, заданою продуктивністю обробки та заданою шорсткістю поверхні.

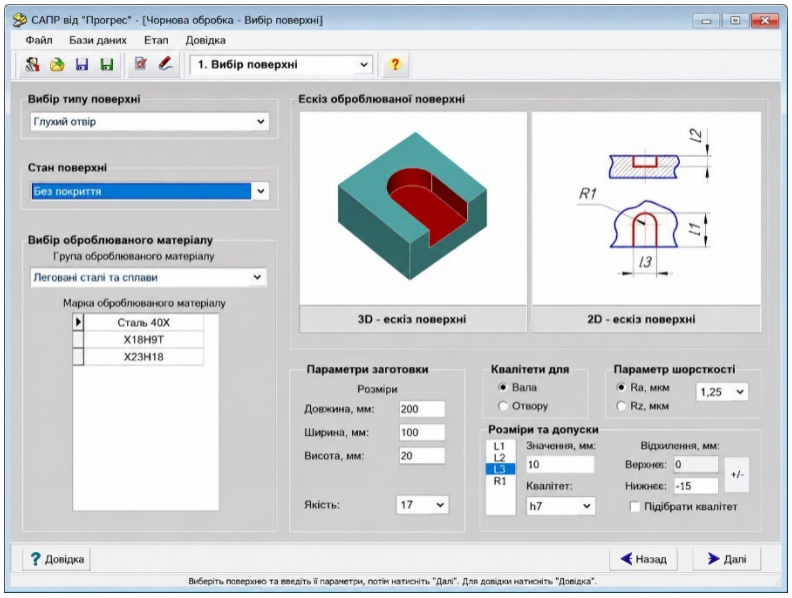


Рис. 5.12. Екранна форма першого етапу проектування – вибір поверхні.

Четвертим етапом проектування є вибір обладнання, де система на основі раніше отриманих даних формує перелік верстатів та виводить його на екран. При цьому проектувальник, як і при виборі інструменту, може уточнити модель верстата або залишити перший у переліку по-замовчуванню.

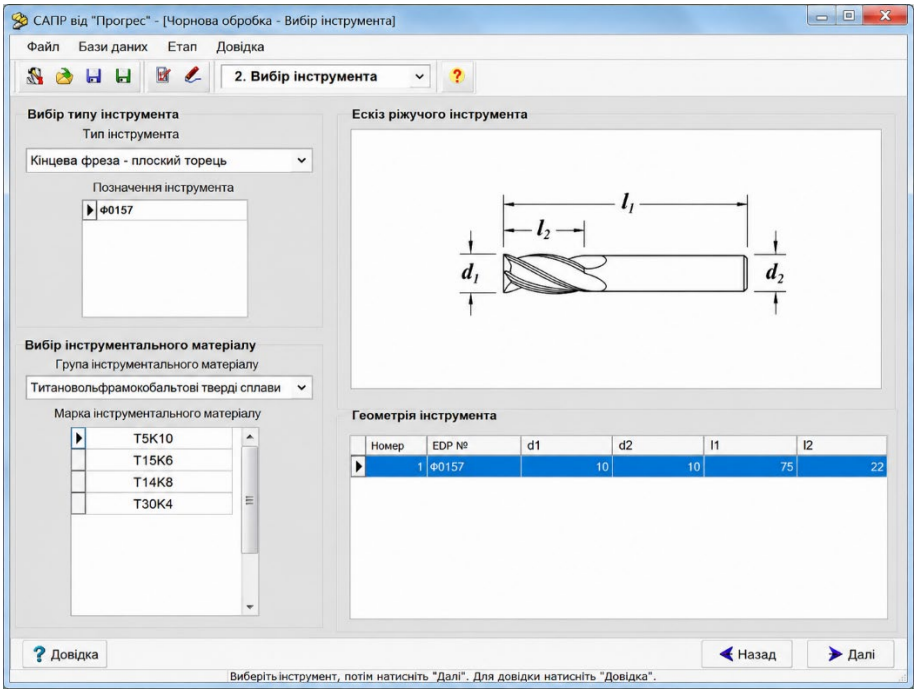


Рис. 5.13. Екранна форма другого етапу проектування – вибір інструменту.

Останнім етапом проектування є виведення результатів проектування, де у відповідному вікні виводяться результати роботи системи (рис. 5.15). Тут є можливість вибрати іншу поверхню для проектування або зберегти результати роботи системи у відповідному файлі для формування вихідної технологічної документації, а також створити файл даних для роботи системи автоматизованої розробки керуючих програм для верстатів з ЧПК.

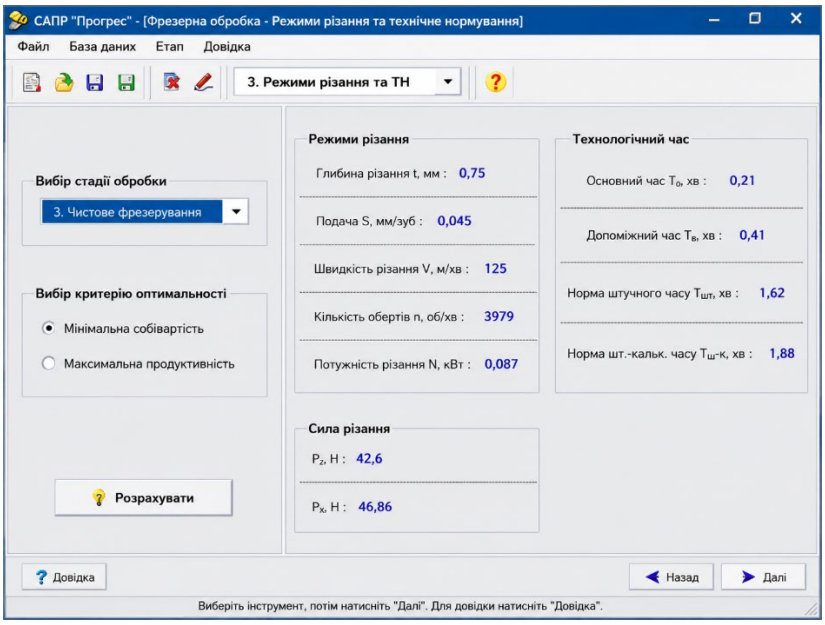


Рис. 5.14. Вікно розрахунку й оптимізації режимів різання та норм часу.

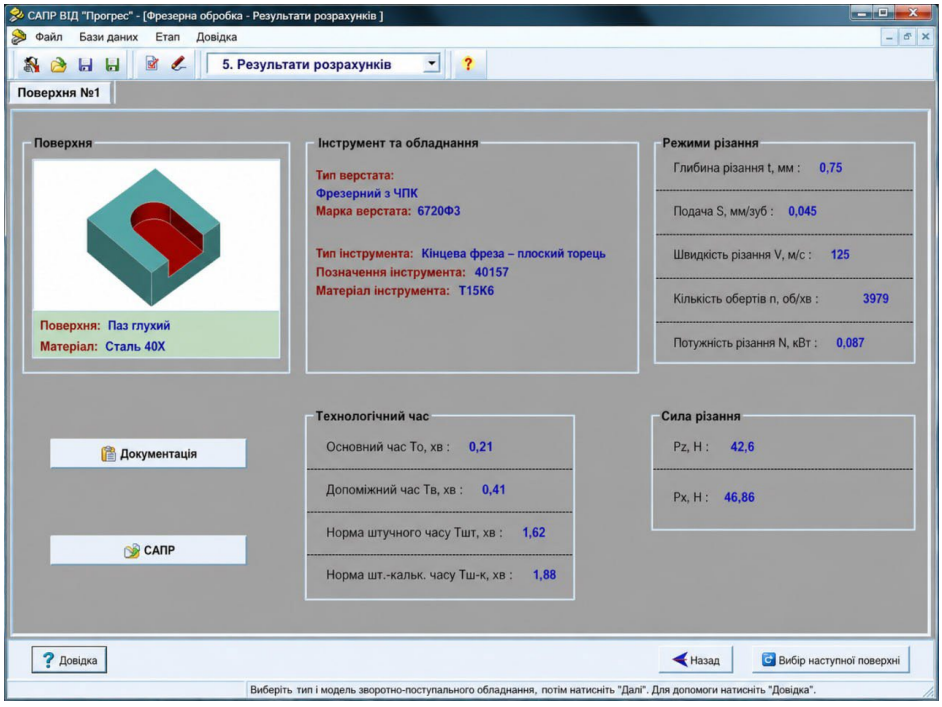


Рис. 5.15. Екранна форма останнього етапу проектування – виведення результатів.

Запропонована методика формалізації опису деталей з метою автоматизації проектування технології їх визначення враховує не тільки конструктивні, а і технологічні їх характеристики. Вона орієнтована на дрібносерійне та серійне виробництво, що є характерним для сучасного приладо- та машинобудівного виробництва.

Встановлені конструктивно-технологічні ознаки корпусних деталей дозволяють однозначно описати всі особливості оброблюваної деталі з метою отримання інформаційної моделі деталі та подальшого визначення класифікаційної групи, до якої вона відноситься.

Застосування методики розпізнавання образів, що використовується при визначенні класифікаційної групи та типових операцій із узагальненого маршруту, які відповідають характеристикам оброблюваної деталі, дозволяє з великою точністю розв’язати поставлену задачу – отримати необхідний технологічний процес виготовлення деталі.

Розроблені алгоритми формування узагальненого маршруту обробки деталі визначеної групи, вибору операцій із узагальненого маршруту при проектуванні технології виготовлення конкретної деталі та алгоритм процесу проектування технологічного процесу дозволяють їх використовувати в якості математичного забезпечення при створенні автоматизованих систем проектування технологічних процесів.

Розроблений метод і алгоритми автоматизованого проектування операційної технології, що базується на принципах структуризації рішень і глибокої декомпозиції, дає можливість підвищити рівень автоматизації САПР ОТ, значно спростити процес проектування за рахунок створення високоефективних баз даних і знань, де б містилася вся необхідна для проектування інформація, а також отримати оптимальні параметри обробки типових поверхонь приладів та машин.

Створені програми, що реалізують надані алгоритми, показали доцільність використання запропонованої методики для автоматизації проектування технологічних процесів виготовлення деталей на основі

класифікації та розпізнавання образів. Ці програми можуть використовуватись як автономно для проектування технології виготовлення корпусних деталей, так і в якості складової підсистеми в комплексній автоматизованій системі проектування виробів приладо- та машинобудування.

Питання для самоконтролю

1. Вкажіть сутність інформаційної моделі деталі.
2. Яка мета створення інформаційної моделі деталі?
3. Які основні елементи входять до інформаційної моделі?
4. Вкажіть параметри деталі, що враховуються при побудові моделі.
5. Наведіть вимоги до інформаційної моделі деталі.
6. Які етапи побудови інформаційної моделі?
7. Які задачі технологічного проектування розв’язуються за допомогою інформаційної моделі?
8. Які методи формалізації геометрії деталі використовуються?
9. Як інформаційна модель інтегрується в CAD/CAM системи?
10. Як оцінюється адекватність інформаційної моделі?
11. Які переваги має цифрове представлення деталей?
12. У чому полягає роль баз даних у технологічному проектуванні?
13. Вкажіть роль інформаційних зв’язків деталі у автоматизованому проектуванні.
14. Які типи інформаційних зв’язків існують?
15. Які методи аналізу інформаційних зв’язків використовуються?
16. Що таке інтегрована система проектування?
17. Які моделі інформаційних зв’язків використовуються в CAD/CAM системах?
18. Що таке база технологічних знань?
19. Які вимоги висуваються до інформаційного забезпечення систем проектування?
20. Як здійснюється взаємодія між CAD і CAM системами?

21. Що таке цифровий двійник виробу?

22. Наведіть сутність формалізації опису деталі.

23. Вкажіть мету формалізації технологічної інформації.

24. Які параметри використовуються для формалізованого опису деталі?

25. Що таке кодування технологічної інформації?

26. Які переваги має формалізований опис деталей?

27. Вкажіть класифікаційні ознаки деталі.

28. Як здійснюється групування деталей за технологічними ознаками?

29. Які системи кодування використовуються у технологічному проектуванні?

30. Що таке параметричний опис деталі?

31. Які задачі автоматизації розв'язуються шляхом формалізації?

32. Які перспективи розвитку формалізованого опису деталей?

33. Наведіть структурну схему інформаційної моделі деталі.

34. Вкажіть методи дослідження інформаційних моделей.

35. Як визначаються інформаційні зв'язки між елементами моделі деталі?

36. Вкажіть критерії ефективності інформаційної моделі.

37. Які математичні методи використовуються для аналізу структури деталі?

38. Що таке графова модель технологічної системи?

39. Які переваги має структурний аналіз моделей?

40. Як структурна схема використовується в автоматизованому проектуванні?

41. Які задачі приладобудування потребують структурного аналізу?

42. Як оцінюється адекватність структурної моделі деталі?

43. Яка роль інформаційних технологій у дослідженні моделей деталей?

44. Що включає математичне забезпечення САПР?

45. Яка роль програмного забезпечення в автоматизованому проектуванні?

46. Які задачі розв’язує математичне забезпечення САПР?

47. Які математичні моделі використовуються для проектування технології виготовлення типових деталей?

48. Які функції виконує програмне забезпечення САПР?

49. Які вимоги висуваються до програмного забезпечення автоматизованих систем?

50. Вкажіть сутність інтегрованих автоматизованих систем проектування?

51. Які методи оптимізації використовуються в САПР?

52. Як забезпечується взаємодія між підсистемами САПР?

53. Вкажіть методи тестування програмного забезпечення.

54. Як оцінюється ефективність автоматизованої системи?

55. Які перспективи розвитку інтелектуальних САПР?

56. Які перспективи цифрового виробництва у приладобудуванні?

57. Яка мета автоматизованого проектування технологічних процесів?

58. Які етапи автоматизованого проектування маршрутної технології?

59. Які дані необхідні для автоматизованого проектування операційної технології?

60. Вкажіть методи оптимізації технологічних маршрутів?

61. Вкажіть перспективи розвитку автоматизованого технологічного проектування.

62. Яка роль цифрових технологій у проектуванні виробництва?

РОЗДІЛ 6
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ РОБІТ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

В розділі вирішуються питання формалізації опису об’єктів складання, та технологічних процесів їх складання, а також створення автоматизованої системи проектування технологічних процесів механоскладальних робіт на їх основі. Для цього розглядаються інформаційні зв’язки в виробі та технології його складання. На основі формалізації технологічних процесів механоскладальних робіт розроблено методики розв’язання основних задач складання виробів, включаючи побудову порядку складання і структури технологічного процесу, опис алгоритмів класифікації виробів приладобудування та проектування технології складання приладів на основі їх групування що забезпечують програмну реалізацію даних методики [6, 7, 8].

В розділі наведено структурну та функціональну схему автоматизованої системи проектування технології механоскладальних і електромонтажних робіт в приладобудуванні „ТехноМастер”, а також інформаційне, математичне, програмне та методичне забезпечення цієї системи. Дано рекомендації з використання автоматизованої системи в комплексі з CAD – системою твердотільного проектування виробів Solid Works.

6.1. Технологічні основи автоматизації проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні

6.1.1. Задачі, розв’язувані при автоматизації проектування технології механоскладальних робіт

Автоматизація технологічної підготовки виробництва (ТПВ) є ключовим фактором забезпечення конкурентоспроможності виробів в ринкових умовах. Швидка підготовка виробництва нової продукції і постійної модернізації старої неможлива без автоматизації розв’язання основних задач ТПВ, до яких

відноситься проектування технології механоскладальних робіт.

Інформація, що міститься в технологічному процесі складання, є вихідною для вирішення більшості завдань планування і організації виробництва, вона визначає вимоги до технології механічної обробки, заготівельного та інших виробництв.

Крім того, підвищені вимоги до термінів зміни продукції та їх якості, а також тенденція до широкого впровадження інформаційних технологій, розвиток імітаційного моделювання організації віртуальних виробництв роблять актуальним проблему розробки таких методів автоматизованого проектування технологічних процесів, які забезпечують максимальний рівень автоматизації та інваріантності щодо класів виробів.

В цілому проектування технологічного процесу складання в приладобудівному серійному і дрібносерійному виробництві можна представити в вигляді розв’язання таких основних задач:

1) технологічне розчленовування (визначення технологічної схеми складального складу);

2) побудова технологічної схеми складання (послідовності встановлення деталей і складальних одиниць у виробі);

3) визначення складу і послідовності операцій з виконання з'єднань відповідно вимог до точності й технічних умов складання;

4) визначення засобів технологічного оснащення складальних робіт.

Процес проектування технології складання виробу і складальних одиниць можна представити у вигляді побудови деякої траєкторії в просторі станів, що відображає складальний процес як послідовність надходження на складання деталей і засобів для приєднання деталей (складальних одиниць) один до одного при забезпеченні необхідної якості. Така траєкторія описує послідовність фіксованих станів складальної одиниці, яка складається, і що є етапами технологічного процесу складання. Кожен фіксований стан описується як функція від множини змінних:

$$y = f(a_1, a_2, a_3, ..., a_n),$$

де $a_1, a_2, a_3, ..., a_n$ – змінні, які приймають значення на множині об'єктів, і які забезпечують виконання чергового етапу процесу складання.

Траєкторія технологічного процесу складання представляється в n-вимірному просторі, де n – кількість множин об'єктів, що описують всі фіксовані перебування на цій траєкторії. До цих множин відноситься множина деталей виробу, складального устаткування, складального інструменту, допоміжних матеріалів тощо.

Чергове фіксоване перебування складальної одиниці на траєкторії відповідає приєднанню чергової деталі до раніше складених за допомогою деякого набору технологічних дій і необхідних засобів. Таким чином, для побудови траєкторії технологічного процесу всього складання необхідно визначити: послідовність надходження деталей на складання складальної одиниці або виробу; послідовність дій, необхідних для забезпечення необхідної якості з'єднань; склад засобів, необхідних для приєднання кожного елементу.

Послідовність приєднання деталей в процесі складання залежить в основному від конструкції складальної одиниці або виробу, що складається.

При призначенні засобів, необхідних для приєднання кожної деталі, необхідно встановити відповідності, згідно з якими для будь-якого з'єднання можна визначити необхідні засоби. Такі відповідності встановлюють через властивості відносин деталей в конструкції. Наприклад, застосування посадки деталі з натягом зумовлює необхідність устаткування і інструменту для запресування.

Проектування технологічного процесу складання при такій постановці задачі зводиться до визначення порядку встановлення деталей на основі аналізу властивостей конструкції, що впливають на цей порядок, після чого на основі попередніх встановлених відповідностей між властивостями деталей конструкції і технологічними засобами вибирають необхідні засоби. Таким же чином визначається склад робіт, необхідний для забезпечення необхідних

параметрів. Отже, всі фіксовані перебування на даній траєкторії будуть повністю визначені.

6.1.2. Формалізація процесу проектування технології складання виробів приладобудування

Аналіз функціональних зв'язків об'єктів технології і конструкції, що зумовлюють вибір технологічних проектних рішень, дозволяє виявити і формалізувати основні закономірності проектування технології складання.

Узагальнена функція проектування технології може бути представлена кортежем функцій рішення окремих технологічних задач:

$$F = \langle F_1,...,F_i,...,F_n \rangle.$$

Кожна функція рішення F_i може бути представлена кортежем функцій спеціального вигляду:

$$F_i =< Q_1, P_1, Q_2, P_2,..., P_{n-1}, Q_n >,$$

де $Q_m = f(x_1,...,x_n)$ – функції, що дозволяють описати взаємодію об'єктів технології за етапами проектування технології;

$x_1,...,x_n$ – параметри проектування технології;

$P_m = (Q_i,...,Q_j)$ – функції, що забезпечують перетворення і побудову їх послідовності.

Процес проектування може бути представлено як функції опису станів, описи взаємодій елементів технології, що є на кожному етапі проектування, через їх відносини і умови істинності цих відносин (допустимості взаємодій) і функції переходу, що описують закономірності переходу від одного стану до іншого. Таким чином, задача синтезу технологічного процесу зводиться до визначення розглянутих вище функцій – визначення множин, що їх характеризують, і законів, що встановлюють відповідність між їх елементами.

Як змістовний аналог функції стану, може бути розглянута технологічна операція. Кожна операція перетворює виріб, що виготовляється, з одного стану в інший і характеризується показниками якості технологічного процесу, складом приєднуваних елементів і використовуваних матеріалів, устаткуванням, інструментом і оснащенням.

Всю множину функцій, що описують процес проектування технології складального виробництва, можна звести до чотирьох класів: класифікації, впорядкування, структуризації і розрахунковий. Функції кожного з цих класів встановлюють певні відносини між елементами технології. В функції класифікації F_1 використані базові відносини еквівалентності і визначення. Ці функції описані різною множиною об'єктів технології і їх властивостями.

Так, наприклад, за допомогою функції класифікації сформовані класи з'єднань по видах закріплення деталей, по характеру їх взаємодій з іншими деталями виробу тощо.

Ці ж функції використані при класифікації різних зв'язків, устаткування, інструменту і т.п. Це забезпечує вибір необхідних елементів з сформованих класів.

Функції впорядкування F_2 є найбільш складними і відповідальними частково через використання їх для розв’язання основоположної при проектуванні технології задачі формування структури технологічного процесу, частково через різноманітність властивостей і відносин, використовуваних в цих функціях.

Функції структуризації F_3 направлені на побудову структурних елементів технологічного процесу: маршруту, технологічної операції і переходу.

Процедури розрахунку носять аналітичний характер і застосовуються, зокрема, при розрахунку розмірних ланцюгів, параметрів інструменту тощо.

Процедурні частини функцій F_1, F_2, F_3, F_4 визначаються надалі при побудові логічної моделі, де описуються умови і визначення їх областей існування.

Порядок виготовлення виробу в технологічному процесі складання є сукупністю порядків різних об'єктів: T_a – встановлення деталей при складанні; T_s– виконання з'єднань; T_{sb} – виконання складальних одиниць; Tv – виконання складальних операцій по видах; T_p– виконання переходів з кожного виду складальних операцій.

Порядки T_a і T_s визначають можливий порядок деталей в процесі складання виробу і знаходяться залежно від взаємодій елементів в конструкції. Ці взаємодії характеризуються через розмірні зв'язки R, що задають відносне положення елементів, і взаємні обмеження переміщень елементів в конструкції виробу Q.

Таким чином, існує функціональний зв'язок, в якому залежно від взаємодій елементів конструкції встановлюється можливий порядок, тобто

$$T_a = f_1(Q, R)$$

$$T_s = f_2(Q, R)$$

де f_1 – функція перетворення даних про взаємодію елементів в конструкції в дані про можливий порядок їх встановлення;

f_2 – функція перетворення даних про взаємодію елементів конструкції в дані про порядок виконання з'єднань.

Порядок виконання процесу складання T_{sb} залежить від складу складальних одиниць A_{sb}, тобто справедлива залежність

$$\mathrm{T_{sb}} = f_3(\mathrm{A_{sb}}),$$

де f_3 – функція перетворення даних про склад складальних одиниць в дані про порядок їх виконання.

Порядки складання T_v і T_p визначають порядок технологічних дій зі забезпечення технічних вимог, точності необхідних параметрів і технології виконання окремих видів робіт. Цей порядок, як правило, регламентований

різними інструкціями, керівними матеріалами, які є узагальненням накопиченого досвіду і знань. Фактично в цих матеріалах містяться закони f_4, f_5 побудови порядків T_v і T_p на множині тих видів операції P_v і переходів $П$, які треба виконати для забезпечення складання виробу з необхідною якістю, тобто мають місце залежності

$$Tv = f_4(Pv) \quad \text{та} \quad Tp = f_5(П).$$

У свою чергу, як видно з схеми, склад технологічних операцій $П$, види операцій P_v і склад складальних одиниць теж є залежними параметрами. Склад технологічних операцій $П$ залежить від виду операції P_s, тобто

$$П = f_6(Pv, Ps),$$

де f_6 – функція перетворення даних у вигляді операції в дані про склад технологічної операції.

Вид технологічної операції P_v залежить від властивостей з'єднань P_s і способу забезпечення точності при складанні P_t, тобто

$$Pv = f_7(Ps, Pt)$$

де f_7 – функція перетворення даних про властивості з'єднань і способи забезпечення точності в дані про вид технологічної операції.

Склад складальних одиниць A_{sb} залежить від можливої послідовності з'єднання Ps і організаційної форми складання P_{or}, тобто

$$\text{Asb} = f_8(Por, Ps, Ts),$$

де f_8 – функція перетворення даних про властивості з'єднань, організаційної форми складання, можливого порядку з'єднань в дані про склад складальних одиниць.

Розглянутий вище зміст завдань проектування технологічного процесу складання і їх взаємозв'язок показує, що для реалізації методу

автоматизованого синтезу технологічних процесів на основі взаємозв'язків елементів конструкції виробів (деталей) і елементів виробничого середовища необхідно визначити властивості об'єктів технологічного процесу, відносини, що характеризують їх взаємодію в технологічному процесі, а також функції, що описують умови формування дійсних відносин на наочних областях за етапами технологічного процесу.

Досягти високої точності та надійності роботи таких складних пристроїв, якими є сучасні прилади, можна лише за рахунок особливої організації складальних процесів.

Загальним змістом підготовки виробництва у частині складального процесу є: визначення найбільш раціональних методів та послідовностей складання виробу та його складальних одиниць; планування складальних операцій та режимів складання по елементам; вибір та конструювання необхідної для складання оснастки; призначення технічних умов на складання вузлів та вибір методів контролю; встановлення норм часу на виконання складальних операцій.

Послідовність складання або певна послідовність з’єднання елементів виробу визначається технічними вимогами та економічною доцільністю процесу.

6.2. Технологічні особливості складання виробів приладобудування

Всі виконувані в процесі виготовлення приладів операції, що забезпечують визначену точність приладів та надійність їх роботи можна поділити на:

1) підготовчі та допоміжні, до яких відносять комплектувальні, промивочні, сортувальні, пакувальні операції тощо;

2) складально-з'єднувальні операції з встановлення, набирання, вдівання, загвинчування тощо;

3) операції отримання нероз’ємних з’єднань: пресування, клепання, склеювання тощо;

4) електромонтажні та намотувальні операції;

5) слюсарно-припасувальні та доводочні операції;

6) регулювально-налагоджувальні операції з доведення різних характеристик складальних одиниць та приладів в цілому: юстирування оптичних елементів, балансування обертових елементів тощо;

7) контрольно-вимірювальні операції під час вхідного, операційного, між операційного та заключного контролю різноманітних вхідних і вихідних характеристик деталей, складальних одиниць та приладів;

8) випробувально-повірочні операції з вимірювання основних робочих характеристик і надійної роботи приладу.

Питома вага наведених операцій залежить від конструктивної складності приладів, вимог до точності їх виготовлення та надійності роботи. При цьому трудомісткість операцій зростає з підвищенням вимог до точності та надійності приладів.

6.2.1. Класифікація та групування виробів приладобудування

Використання групової технології в приладобудівному виробництві є одним із основних напрямків підвищення його ефективності. Стримує широке застосування групової технології в даний час на підприємствах недостатній ступінь автоматизації технологічної підготовки групового виробництва.

Аналіз існуючих систем технологічної підготовки групового виробництва (ТПГВ) показав що: жодна з них не здатна вирішувати всі задачі; частина вихідної інформації дублюється на інших етапах ТПГВ.

Змістовна повторюваність деяких задач ТПГВ на ряді етапів підказує, що уникнути вказаних недоліків можливо шляхом уніфікації технологічної підготовки виробництва, що дозволить послідовно, поетапно вирішувати задачі на основі єдиного інформаційного блоку. Таким інформаційним блоком повинна стати багаторівнева класифікаційна система виробів, що адекватно відображає особливості поетапного розвитку серійного виробництва.

Використання ЄСТПВ, що забезпечує рішення не тільки

конструкторсько-технологічних, але й багатьох інженерно-технічних та техніко-економічних задач з використанням сучасних математичних методів та засобів обчислювальної техніки дозволить розв'язати задачу групового виробництва. Нормальне функціонування ЄСТПВ не можливе без раціонально побудованої системи інформаційного забезпечення, основою якої є система класифікації та кодування конструкторської, технологічної та техніко-економічної інформації.

Класифікація зазвичай визначає розподіл множини об'єктів за заданими ознаками на підмножини, які мають назву класифікаційних групувань. У державних стандартах визначено два методи класифікації: ієрархічний, при якому задана множина послідовно поділяється на підмножини, та фасетний, при якому задана множина поділяється на незалежні групування за різними ознаками класифікації.

Опис складальних одиниць та приладів в цілому здійснюється за допомогою конструктивно-технологічних властивостей. Склад цих властивостей визначається шляхом класифікації складальних одиниць. При цьому конструктивно – технологічні властивості використовуються у якості класифікаційних ознак. Таким чином принципи, що закладені у методиці класифікації, визначають правила виявлення та формування складу ознак, а також способи їх опису та систематизації.

6.2.2. Створення інформаційної моделі виробу

Інформаційну модель виробу, що складається, можна описати множиною X його властивостей, які представляються сукупністю конструктивно-технологічних параметрів як самого виробу, так і його компонентів. Цю множину X можна розбити на підмножини X_{ij} різних ієрархічних рівнів, які не перетинаються з врахуванням структури виробу та реальних зв'язків між компонентами. Тоді інформаційну модель виробу, що складається, можна представити в вигляді деревовидного графу, який визначає схему потоків інформації від початкових даних до кінцевих результатів проектування. В

цьому графі кореневі вершини описують загальні властивості виробу, а інші вершини – властивості окремих його компонентів. Дуги графа вказують на взаємозв'язок всіх компонентів системи у процесі складання.

Побудована таким чином модель відображає структуру виробу. Ієрархія моделі відображає порядок відношень між структурними компонентами, причому параметри більш високого ієрархічного рівня є узагальненням параметрів більш низького рівня. Це означає, що граф-дерево є орієнтованим, причому однонаправленим.

Побудовою структурної компоненти моделі є формування структури завершального інформаційного графа – дерева, вершинам якого поставлені у відповідність всі структурні компоненти. Кореню такого дерева відповідає основна структура моделі, а вершинам – проміжні, вивідні та початкові компоненти [9.46]. Структурну компоненту позначають як $\hat{x}$.

Для отримання структурної компоненти на лінії зв'язків дерева накладають обмеження, які визначають напрям потоку формування узагальненої інформації про виріб. Тоді дуга, що з'єднує вершини $\hat{x}_i$ та $\hat{x}_j$, показує що компонента $\hat{x}_i$ враховується при розрахунку компоненти $\hat{x}_j$ при $\hat{x}_i < \hat{x}_j$. Шлях в такому графі проходить від початкової компоненти $\hat{x}_i$ крізь проміжні вивідні компоненти до основної вивідної. Довжина шляху визначається рангом r, який є важливою характеристикою потоку інформації.

Аналіз інформаційного графу дозволяє зробити висновок, що інформаційна модель виробу повністю відображає складальний склад та структуру виробу з врахуванням взаємозв'язків між складовими, а також етапи формування виробу з його складових частин, тобто технологічний процес складання. Використання загальних методів теорії графів спрощує дослідження моделі як об'єкту автоматизації його складання та дає можливість вирішувати цю задачу за допомогою комп'ютера.

В основу інформаційних моделей опису елементів конструкцій складальних одиниць приладів покладено формалізм, який повинен бути

достатньою спільним та здатним до представлення інформації. Для цього доцільно використовувати поняття реляційної системи.

Інформаційна структура, що описує конструкцію приладу є реляційною системою $W = \langle X, R \rangle$, в якій X – множина об'єктів цієї конструкції, R – предикат, визначений на множині X, що задає властивості або взаємозв'язки об'єктів. Ця модель W може бути визначена, як набір типів відношень R_i, де i = 1,2,...,n - кількість наборів типів відношень, під якими розуміють множину відношень даного ступеню на можливих носіях (деталі, складальні одиниці, тощо), що задовольняє визначеним обмеженням. Такими обмеженнями тут є формули мови розрахунку предикатів. Основним елементом моделі опису елементу конструкції є набір даних, тобто поняття та імена, що складаються з власника набору (ім'я елементів конструкції) та одного або декількох членів набору (тип елементу, поверхня зв'язку, тощо). Як власник, так і кожен з членів набору є записом, що складається з імені запису, що його ідентифікує, та полів запису, що визначають властивості об'єкту. Кожен такий набір даних має власне ім'я.

З врахуванням прийнятих визначень інформаційних моделей представлення даних розроблено моделі опису елементів конструкції складальних одиниць приладів.

6.3. Моделювання технології складання приладів

6.3.1. Інформаційні зв'язки в технологічних процесах складання виробів приладобудування

Процес проектування технології складання приладів можна розглядати як складну систему, яку не можливо коректно описати за допомогою математичних моделей. Такі системи складаються з великої кількості складових елементів і зв'язки між ними складно виразити в явному вигляді та описати кількісно. Ця складність визначається такими характеристиками:

1) багатовимірність системи (великі обсяги циркулюючих інформаційних

потоків, велика кількість елементів);

2) велика кількість форм зв’язку елементів систем між собою (різнорідність структур, що використовуються, – деревовидних, ієрархічних);

3) багатокритеріальність, тобто наявність декількох, протилежних критеріїв, яким повинна задовольняти система;

4) велика кількість елементів, що складають систему.

Вказані характеристики визначають процес проектування технології складальних робіт в приладобудуванні. При цьому використовуються великі масиви інформації – методи складання, обладнання та інструмент, різновиди деталей тощо. Тут використовується постійна інформація, що характеризує умови виробництва, умовно-постійна інформація про обладнання та інструмент, інформація про режими і умови складання та способи забезпечення точності, а також змінна інформація про виріб, що складається, тобто відомості про деталі, складальні одиниці, зв’язки між ними тощо.

Для опису послідовності проектування технології складання необхідно визначити етапи отримання інформації, її склад та функції, за допомогою яких ця інформація може бути отримана.

Математичний опис задачі побудови послідовності складання доцільно виконувати на двох рівнях.

На першому рівні будується інформаційна модель проектування, де здійснюється класифікація об’єктів, їх відношення та розкривається структура розв’язання поставленої задачі..

На другому рівні будується логічна модель, де описуються функції перетворення інформації, яка представлена у вигляді кінцевих множин значень змінних та їх відношень на етапах проектування. На даному рівні розкриваються умови формування підмножин технологічних об’єктів, всі елементи яких мають задані властивості або знаходяться в відповідних відношеннях між собою або з елементами інших множин. Для опису перетворення цих функцій використовується апарат логіки предикатів першого

роду. Інформаційні та логічні зв’язки між елементами виробу та технології його складання можна представити в вигляді схеми, що наведена на рис. 6.1.

Рис. 6.1. Схема інформаційних та логічних зв’язків при проектуванні технології складання виробу.

Інформаційна модель технологічного процесу складання

Інформаційна модель процесу складання будується на основі схеми цільових функцій. Первинні області визначення цих функцій є початковими множинами інформаційної моделі.

Схема цієї моделі відтворює послідовність створення технологічного процесу складання (рис. 6.2).В ній введено такі позначення: *А* – складальний елемент, *С* – обладнання, *В* – технологічна база, *П* – технологічний перехід, *О* – операція.

За допомогою створеної інформаційної моделі можна виявити та сформулювати задачі проектування технології, визначити послідовність їх вирішення, визначити об'єкти та властивості, необхідні для їх розв'язання, тобто визначити множини та схему їх перетворення.

Взаємодія елементів в технологічному процесі представляється як відношення за допомогою декартових добутків. За допомогою підмножини декартових добутків послідовно виділяються елементи множин, для яких відповідні відношення характеризують правильні з технологічної точки зору взаємодії.

Послідовність встановлення деталей у процесі складання визначається як підмножина декартового добутку $T_a \subset A \times A$ елементів, в яких відношення порядку істинне і відповідає вірному порядку деталей в процесі складання. Склад з'єднань визначається як підмножина деталей $S_s \subset A$, які в конструкції утворюють між собою з'єднання. Склад складальної одиниці S_b визначається як підмножина з'єднань $S_b \subset S$, які в технологічному процесі складання можуть бути виділені в окрему складальну одиницю. Порядок виконання складальних одиниць описується підмножиною декартового добутку $S_b \subset S$, в якому відношення порядку відповідає можливій послідовності з'єднання складальних одиниць в процесі складання виробу. Він залежить від складу складальної одиниці A_{sb}, тому що обмеженням цієї послідовності є наявність одних складальних одиниць в інших, тобто має місце залежність $T_{sb} = f_3(A_{sb})$,

де f_3 - функція перетворення даних про склад складальної одиниці в дані про порядок їх з'єднання. Склад складальної одиниці A_{sb} залежить від можливого порядку з'єднання T_s при складанні виробу, властивостей з'єднань P_s та від організаційної форми складання P_{or}, тобто $A_{sb} = f(P_{or}, P_s, T_s)$.

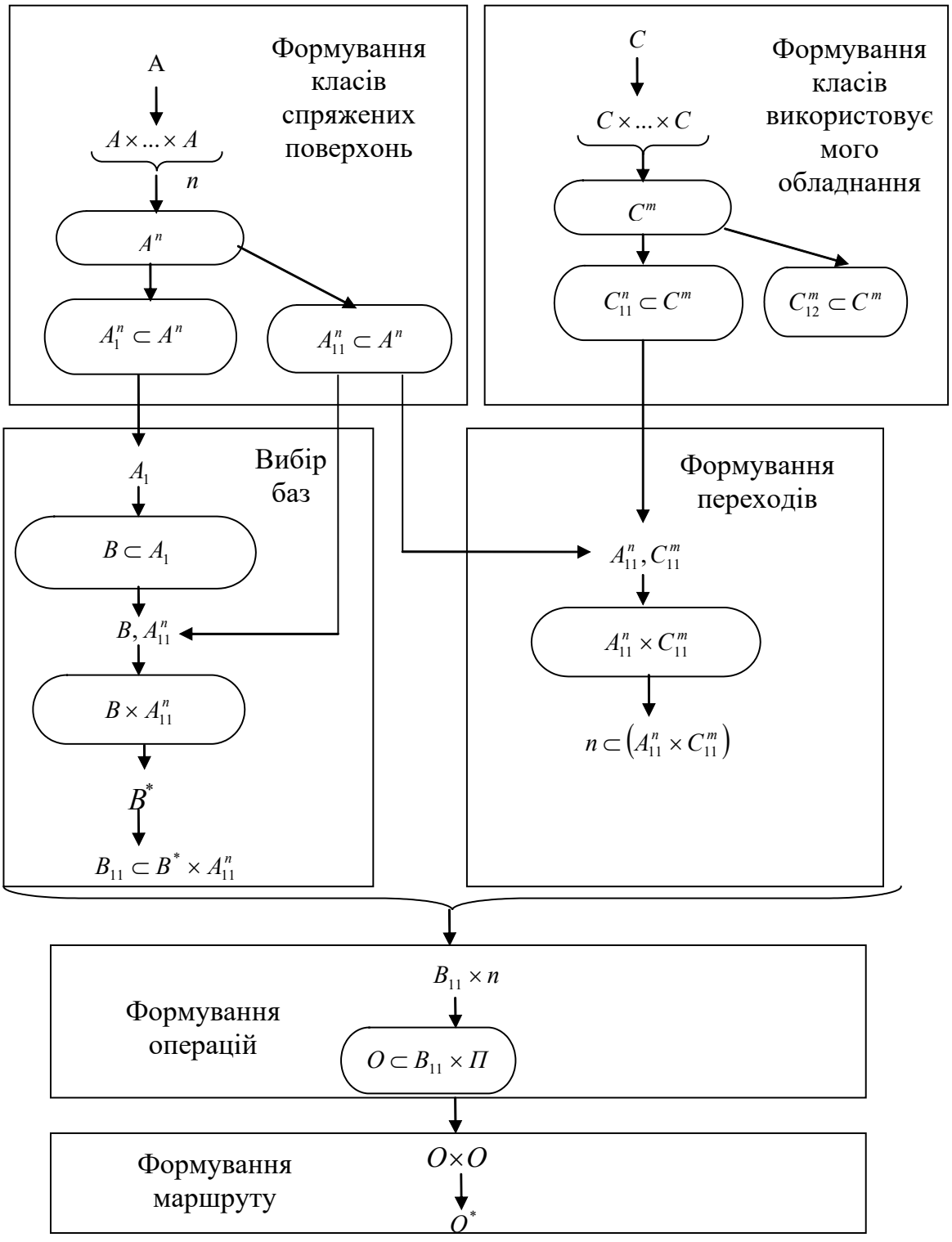


Рис. 6.2. Інформаційна модель процесу проектування технології механоскладальних робіт.

Порядок виконання операцій складання згідно з їх видом T_v та порядок виконання переходів в операції T_p описується підмножиною декартового добутку $T_v \subset P_v \times P_v$ та $T_p \subset \Pi \times \Pi$, де відношення порядку відповідає послідовності виконання різних видів операцій та переходів у технологічному процесі складання.

Вказані підмножини описують різні елементи технологічного процесу складання виробу. Загальний порядок створення виробу можна представити як декартовий добуток

$$T_u \subset A \times S \times S_b \times P_v \times \Pi,$$

де кожен елемент містить в собі часткові порядки складання та відповідає їм.

Можливі варіанти послідовності складання виробу визначаються кількістю елементів у підмножині T_u.Серед цих варіантів знаходиться оптимальний з врахуванням конкретних умов виробництва та технологічної собівартості складання.

Проектування технології складання підрозділяють на дві основні частини, які можна використовувати як автономно, так і спільно:

а) формування схеми складання, що містить інформацію про структуру виробу і послідовності приєднання утворюючих його елементів;

б) формування операцій, що включає визначення складу елементів, які приєднуються, в операції, види робіт, засобів і інших параметрів, що утворюють опис складальних операцій і переходів.

В процесі розв’язання задач першого етапу відповідно до розглянутих логічних моделей здійснюється аналіз заданої конструктором структури виробу, визначаються взаємні обмеження елементів конструкції і будуються схеми базування і доступу. Ці схеми є інформаційною основою для рішення задач технологічного членування, формування з'єднань і побудови послідовності складання. Результат рішення задач даного етапу оформляється у виді технологічної схеми складання.

Формування складальних операцій ґрунтується на традиційних методах пошуку рішень по взаємозалежній системі таблиць відповідностей, що представляються у виді реляційних баз знань. Рішення зводиться до поетапного пошуку за табличними або мережними моделями параметрів опису технологічних переходів і операцій, визначенню засобів і дій, необхідних для виконання вимог до окремих з'єднань і виробу в цілому. Основною задачею автоматизації даного етапу проектування є побудова оптимальної структури взаємозалежних таблиць відповідності.

Організація автоматизованого проектування технологічного процесу складання відповідає традиційному проектуванню, де попередньо здійснюється розподіл виробу на технологічно незалежні частини, після чого проектується технологічний процес для кожної частини окремо. Це викликано тим, що технологічний процес складання виробу є сукупністю технологій складання складальних одиниць. Це дає можливість обмежитись розробкою алгоритму проектування технології складання окремої складальної одиниці. В залежності від кількості складальних одиниць, що входять у виріб, достатньо повторювати алгоритм відповідну кількість раз. Це забезпечує універсальність алгоритмічного процесу щодо складності структури виробу.

Склад складальної одиниці визначається специфікацією виробу. Основна процедура розв’язання цієї задачі описується функцією класифікації деталей по ознаці належності до визначеної складальної одиниці. Областю існування функції є множина складальних одиниць виробу, які розбиваються за входженням на рівні, де складальні одиниці включають тільки деталі, а останнім – виріб, що складається.

Задача визначення комплекту для кожного вхідного елемента складальної одиниці поділяється на два етапи.

1. Визначається базова деталь складальної одиниці, тобто та деталь, що встановлює положення розглянутої складальної одиниці Sb_i у складальній одиниці Sb_j наступного порядку, причому $Sb_i \in Sb_j$. При цьому описується функція, що відображає взаємодію елементів підмножини Sb_i, які утворюють

розглянуту складальну одиницю, і елементів підмножини $B=Sb_j/Sb_i$ – всіх інших елементів складальної одиниці Sb_j. Кожна складальна одиниця розглядається як підмножина деталей виробу $Sb_i \subset A$.

Відношення базування, яке визначається, $R_b \subset Sb_i \times B$ входять у підмножину пар, які задовольняють умові

$$R_b^1 = \left\{ (w_1, w_2) / w_1 \in Sb_i, w_2 \in Sb_i, w_1 \xrightarrow{b} w_2 \right\},$$

де $w_1 \xrightarrow{b} w_2$ – відношення базування між елементами w_1 і w_2, w_1, w_2– змінні на множині Sb_i.

2. Будується спрямований ациклічний граф, що описує схему базування, вершинами якого є елементи складальної одиниці, а дуги характеризують зв'язок по базуванню.

Розв’язання задач другого етапу реалізується процедурою, що відображає взаємодію елементів $w_i \in Sb_i$, а результатом – є формування підмножини пар елементів із установленим відношенням базування в розглянутій складальній одиниці $AB \subseteq Sb_i^2$:

$$AB = \left\{ (w_1, w_2) / w_1 \in Sb_i, w_2 \in Sb_i, w_1 \overset{b}{\rightarrow} w_2 \right\}$$

де $w_1 \overset{b}{\rightarrow} w_2$- відношення базування між елементами w_1 і w_2; w_1, w_2 - змінні на множині Sb_i.

Після цього вирішується задача побудови схеми доступу, де для кожного елемента складальної одиниці Sb_i визначаються елементи, що обмежують його доступ до місця установки. Розв’язання цієї задачі описується функцією, що відображає взаємодію елементів $w_i \in Sb_i$. Результатом розв’язання задачі є підмножини пар елементів із установленим відношенням доступу $AD \subseteq Sb_i$

$$AD = \left\{ (w_1, w_2) / w_1 \in Sb_i, w_2 \in Sb_i, w_1 - \subset w_2 \right\},$$

де $w_1 - \subset w_2$ – відношення, що характеризує обмеження елементом w_1 доступу до місця встановлення елемента w_2;

w_1, w_2 – змінні на множині Sb_i елементів розглянутої складальної одиниці.

Надалі розв'язується задача технологічного поділу складальної одиниці. Тут конструкторська складальна одиниця розбивається на декілька технологічних. У результаті цього забезпечується можливість складання окремих частин незалежно одна від другої. Розв'язання цієї задачі полягає в визначенні з множини елементів конструкторської складальної одиниці підмножин, що утворюють технологічну складальну одиницю $Sb_j^1 \subseteq Sb_j^j$

$$Sb_j = \{(w_1,...,w_n) w_1 \in SA_i,...,w_n \in SA_i, \forall w_i \forall w_j [w_i \# w_j]\},$$

де $w_i \# w_j$ – відношення зв'язанності елементів w_i і w_j;

w_1 , w_2 – змінні на множині SA_i

Після цього здійснюється впорядкування елементів виробу згідно з сформованими умовами базування й доступу. Визначивши порядок встановлення елементів (деталей і початкових складальних одиниць) для кожної складальної одиниці, розв'язується задача з формування опису технологічного процесу. Тут в кожному з'єднанні вибираються види робіт, що забезпечують складання відповідно до технічних вимог. Рішення цієї задачі описується функцією класифікації видів робіт на основі конструктивно-технологічних ознак, що впливають на вибір виду складальних робіт. Областю існування функції є множина *R* видів складальних робіт, $R = \{r_1,...,r_k\}$.

Надалі розглянуті алгоритми розв'язання окремих задач формування схеми складання. Процедура розв'язання цих задач є процедурою генерації схеми шляхом послідовного перетворення вихідної інформації з заданої схеми з врахуванням обмежень, згідно з визначеними умовами.

6.3.2. Алгоритм технологічного поділу складальної одиниці на складові елементи

Одним з питань, які необхідно вирішити при розробці автоматизованої системи проектування технології складання, є питання оптимального

технологічного поділу, тобто розбиття конструкції, складальної одиниці на складові частини, які можна складати незалежно одна від одної.

Розроблено алгоритм технологічного поділу виробу на складальні одиниці, що використовує в якості вихідних даних попередньо побудовані схеми базування та доступу, а також данні про з'єднання, які створюють складальні одиниці.

Схема базування для кожної деталі a_i $(i=1,n)$ містить інформацію про склад множини деталей, які є базовими для деталі a_i. Схема доступу для кожної деталі a_i містить інформацію про склад множини деталей, які обмежують доступ a_i деталі до місця встановлення.

Узагальнений алгоритм технологічного поділу включає наступні етапи.

1. Множини з'єднань *S* розбиваються на підмножини $S_1,...,S_k$ з однаковою ознакою „група роботи ".

2. Множини $S_1,...,S_k$ впорядковуються відповідно до необхідного порядку виконання груп робіт.

3. В кожній множині S_i визначають $S_i^k \in S_i$ з'єднання, що обмежують доступ з'єднанням з іншої множини S_j.

4. З'єднання S_i^k переносяться з S_i у S_j якщо $i<j$.

5. Кожна множину S_i розбивається на підмножини $S_i^1,...,S_i^k$, де кожна підмножина, крім першої, містить базові деталі для деталей з'єднань з попередньої підмножини.

6. В черговій підмножині S_i^n визначаються з'єднання з деталями, що обмежують доступ до деталей з'єднань з підмножин з великим порядковим номером.

7. Виділені в S_i^n з'єднання переносяться до складу підмножини.

8. В підмножині S_i^n виділяються групи з'єднань $\{G_{s1},...,G_{sk}\}$, де з'єднання мають хоча б одну загальну деталь.

9. Кожній із сформованих груп з'єднань надається черговий номер технологічної складальної одиниці.

10. Здійснюється перехід до п. 6 до повного перебору всіх груп з'єднань з множини *S.*

Відповідно до алгоритму технологічні складальні одиниці формують по рівнях: на першому рівні – складальні . одиниці, що складаються тільки з деталей, на наступних рівнях – ті, які складаються з деталей і раніше сформованих складальних одиниць.

6.3.3. Формування послідовності складання виробу

Впорядкування груп складальних одиниць по рівнях виконується відповідно до алгоритму технологічного поділу.

Наведений нижче алгоритм описує завершальний етап побудови порядку установки деталей при складанні кожної окремої складальної одиниці.

Основні обмеження, які накладаються на сформований порядок складання деталей, включають: 1) визначеність базування, 2) доступ деталей до місця встановлення**,** 3) готовність баз для встановлення деталі.

Визначеність базування забезпечується виконанням умови: „якщо визначеність базування деякої деталі a_i, забезпечується з'єднанням S_i, то після установки деталі a_i встановлюють усе ще не встановлені деталі даного з'єднання". Доступ деталей забезпечується виконанням умови „якщо деталь a_i обмежує доступ деталі a_j до місця установки, то деталь a_j встановлюють перед деталлю a_i".

Готовність баз забезпечується виконанням умови „якщо деталь a_i, є базовою для деталі a_j , то деталь a_i установлюють перед деталлю a_j".

Початковими даними для розв'язання задачі є попередньо побудовані схеми базування і доступу, а також дані про склад з'єднань.

Схема базування для кожної деталі a_i, містить інформацію про склад базових деталей для деталі a_j. Схема доступу для кожної деталі a_j, містить інформацію про склад деталей, що обмежують доступ деталі a_i, до місця установки. Дані про склад з'єднань являють собою інформацію про те, які

деталі входять до складу кожного з'єднання.

Розроблено узагальнений алгоритм упорядковування з'єднань і деталей в складальній одиниці, що складається з таких етапів.

1. Визначаються множини з'єднань *S*, що включають базову деталь a_b складальної одиниці $S = \{S_j / S_i \in a_b\}$.

2. З'єднанням *S* надається перший порядковий номер (S^1).

3. Визначається множина з'єднань S_k для деталей з'єднання з (S^1)

$$S_k = \left\{ S_j / S_i \overset{b}{\leftrightarrow} S_j, S_i \in S^1 \right\}.$$

4. Із з'єднання S_k виділяється підмножина з'єднань S_r, що не обмежує доступ до з'єднань, що не увійшли в (S^1).

5. З'єднанням S_r надається наступний порядковий номер.

6. Упорядковуються з'єднання складальної одиниці, що залишилися, і в підсумку будується кортеж $S < S^1,...,S^n >$.

7. Вибирається чергове з'єднання S_i з (S^1).

8. Впорядковуються деталі в з'єднанні згідно групового доступу $S_i =< A_1,...,A_i,...,A_n >$, де A_i – підмножина деталей з однаковою групою доступу, *i* – номер групи доступу.

9. Впорядковується множина деталей кожної групи доступу за базуванням.

10. Повторюються пункти 7...9 для всіх S_i з (S^1) і для всіх S^i з *S*.

11. Виключається повторення деталей у різних з'єднаннях.

Побудований за даною схемою порядок виконання з'єднань і установки деталей буде задовольняти розглянутим вище регламентуючим обмеженням.

Таким чином, можна побудувати типову параметричну модель операцій складального процесу. Кожна така модель є описом структури типової операції (ТО) визначеного виду. При цьому склад елементів даної структури може змінюватись в залежності від конструктивно – технологічних особливостей виробу та з'єднань.

Рішення задачі автоматизованого формування складальних операцій зводиться до п’яти основних етапів.

1. Визначаються види операцій за конструктивно-технологічними особливостями виробів, що є необхідними для виконання з'єднань з необхідною якістю.

2. Формується інформація для визначення ТО по кожному з'єднанню на основі визначення властивостей виконуваних з'єднань, видів і розмірів отворів під технологічні й основні кріпильні деталі, вимог до покриття, змащення тощо.

3. Для кожного виду операції з урахуванням особливостей складальної одиниці і виконуваних з'єднань визначається структура ТО, тобто склад ключових і супутніх параметрів.

4. Визначаються значення кожного елемента структури ТО і таким чином, формується в основному зміст технологічної операції.

5. Технологічні операції при необхідності поєднуються в робочі операції з урахуванням єдності видів робіт, устаткування, оснащення, необхідних послідовності і форми організації складального процесу. .

Перші чотири етапи відтворюються на основі розроблених класифікаторів елементів і властивостей складальних одиниць, з'єднань і параметрів операцій, а також табличних математичних моделей, що описують залежності між конструктивно-технологічними особливостями складальних одиниць, з'єднань і деталей, з одного боку, і складом і значеннями параметрів ТО – з іншої.

Моделі містять формалізований опис можливих варіантів наведених дій і їх послідовності.

На основі сформованих узагальнених маршрутів складання виробів кожної класифікаційної групи розроблено алгоритм проектування технології механоскладальних робіт для конкретного виробу відповідної групи (рис. 6.3).

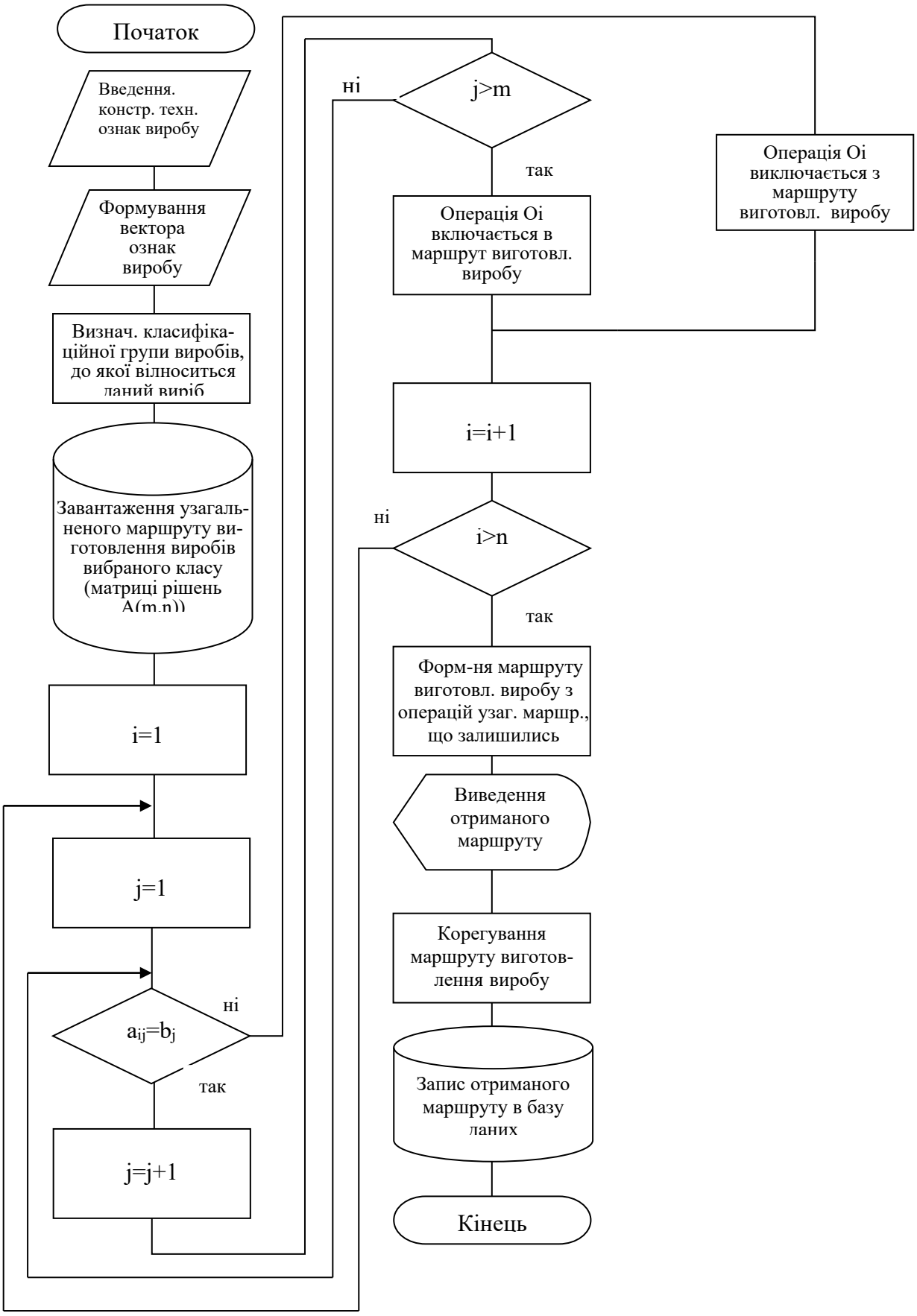


Рис.6.3. Узагальнений алгоритм формування маршрутної технології складання виробів класифікаційної групи

6.4. Автоматизована система проектування технології складання виробів приладобудування

Розглянуті принципи формалізації об’єктів складання, методики класифікації та їх групування, а також автоматизації проектування технологічних процесів механоскладального виробництва реалізовані в запропонованій автоматизованій системі [8].

З врахуванням недоліків наявних систем автоматизації технологічних процесів механоскладального виробництва поставлена задача створення простої в використанні, легкої в оволодінні, надійної системи, що має „дружній” інтерфейс, працює в довільній версії операційної системи Windows та була б невибагливою до технічних засобів. Автоматизована система проектування механоскладальних, а також електромонтажних робіт повинна враховувати особливості приладобудівного виробництва та базуватись на діючих галузевих керуючих матеріалах.

Для логічного структурування створюваної автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт (АСПТ МСР) розроблено структурну схему системи (рис. 6.4).

Система АСПТ МСР „ТехноМайстер” розподіляється на чотири основні блоки: база технологічних даних (БД); блок адміністрування; блок управління БД; функціональний блок. Блок „База технологічних даних” призначений для розміщення та збереження умовно-постійної, а також змінної інформації, яка використовується під час проектування технологічного процесу механоскладальних робіт. Даний блок в свою чергу також поділяється на чотири складові частини: база операцій; база переходів; база обладнання; база інструментів.

Блок адміністрування призначений для визначення шляхів фізичного розміщення баз даних на носії інформації для подальшого використання їх в роботі автоматизованої системи.

Блок управління БД призначений для роботи з базами даних. Зокрема саме цей блок надає можливість користувачу в разі необхідності маніпулювати умовно-постійною інформацією. Даний блок поділяється на дві частини: блок заповнення БД; блок редагування БД.

Функціональний блок є основою під час проектування ТП. В своїй роботі технолог-проектувальник взаємодіє з комп'ютером саме за допомогою цього блоку. Даний блок поділяється на чотири складові частини: частина „Створення ТП"; частина „Редагування ТП"; частина „Експорт / Імпорт ТП"; частина „Формування документації ".

Функціональна схема АСТП МСР призначена для наочного представлення можливостей даної системи, та можливих дій користувача для досягнення певних результатів під час роботи з системою (рис. 6.6).

При взаємодії користувача с автоматизованою системою проектування можливі наступні дії: адміністрування БД; заповнення БД; редагування БД; робота в системі.

Гілка „Адміністрування БД" дозволяє адмініструвати бази даних. Під цим поняттям розуміється визначення шляху до фізичного місця розташування баз даних для подальшої роботи з АСТП МСР „ТехноМайстер". Цей процес розбитий на два етапи: запуск програми ADMIN; визначення шляхів до БД.
Гілка „Заповнення БД" призначена для організації заповнення інформаційних масивів нормативною інформацією, яка використовується під час проектування технологічного процесу. Даний процес має розгалуження на два етапи: запуск програми ENGINE; введення інформації.

Гілка „Редагування БД" дає можливість користувачу при необхідності проводити зміни та вносити корективи в інформацію, яка була попередньо введена в бази даних. Також є можливість видалення непотрібної (застарілої) інформації. Процес редагування розділений на три етапи: запуск програми engine; пошук запису; редагування інформації.

Гілка „Робота в системі " відображає можливі дії користувача під час проектування технологічного процесу. Після етапу „Запуск програми "

відбувається розгалуження на чотири подальші напрямки дії проектувальника: блок „Створення ТП”; блок „Робота з існуючим ТП”; блок „Експорт / Імпорт ТП”; блок „Формування звіту ”.

Блок „Створення ТП” дозволяє створити новий технологічний процес і зберегти його в загальній базі даних. Блок „Робота з існуючим ТП” дає можливість проектувальнику продовжити роботу з технологічним процесом вже записаним в базі даних, або внести певні корективи. Блок „Експорт / Імпорт ТП” дозволяє відокремити один технологічний процес від бази даних (запис ТП в окремий файл), та за допомогою змінного носія даних перенести його на інший комп’ютер. Або навпаки, ТП створений на іншому ПК, вживити (імпортувати) в існуючу базу даних на локальному персональному комп’ютері.

Блок „Формування звіту ” призначений для створення технологічної документації (маршрутної карти), яка формується у вигляді текстового файлу та в подальшому може бути надрукована на папері.

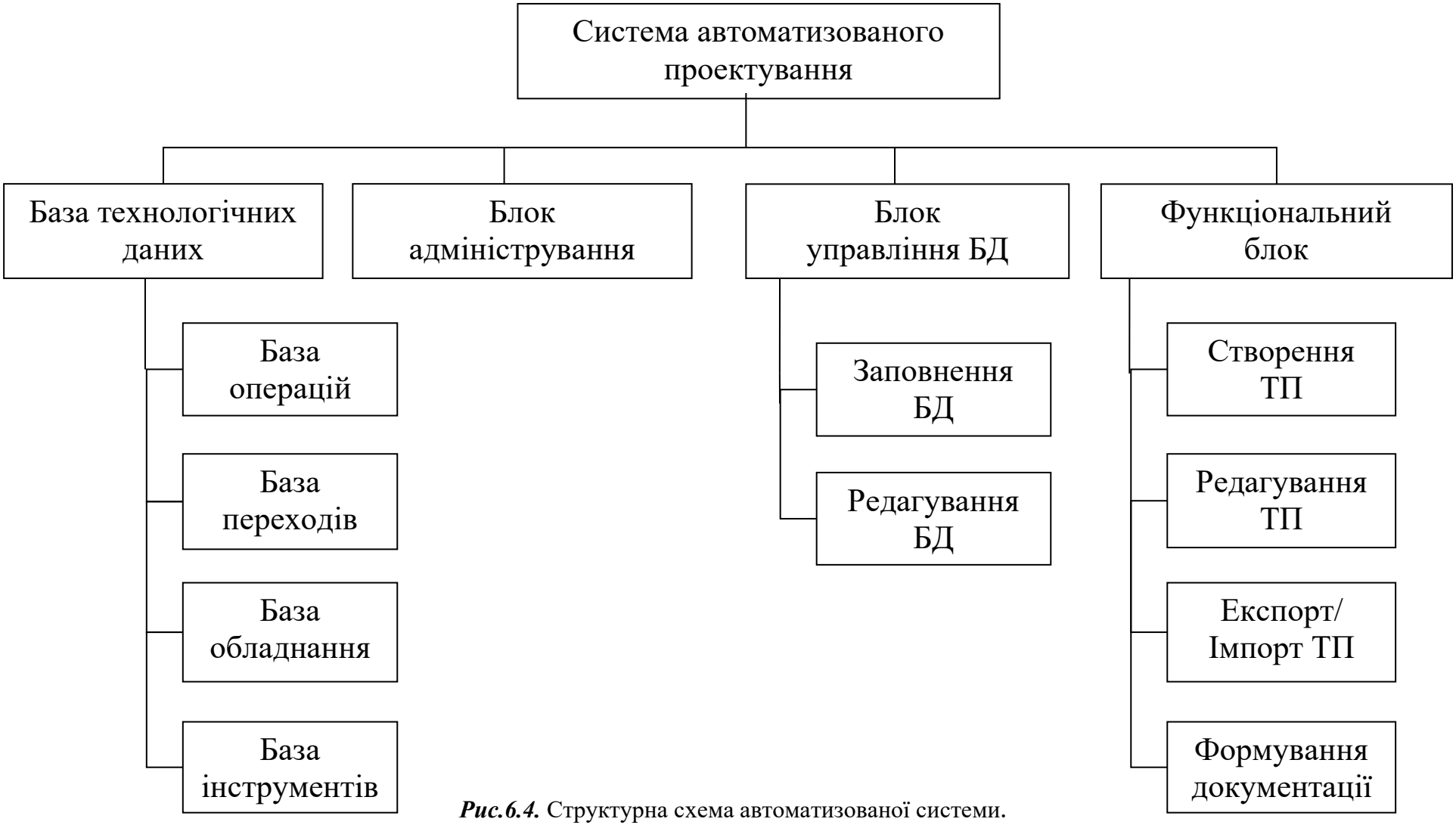


Рис.6.4. Структурна схема автоматизованої системи.

Рис. 6.5. Функціональна схема автоматизованої системи.

Розроблення структурної та функціональної схем дозволяє перейти до наступного етапу – створення всіх **видів забезпечення системи**.

Всю **інформацію**, яка використовується в САПР можна умовно розділити на початкову і похідну.

Початкова інформація існує до початку машинного проектування та в свою чергу підрозділяється на умовно-постійну та змінну. Змінна інформація вводиться в пам’ять комп’ютера кожного разу при проектуванні нового ТП. Умовно-постійна інформація складається з нормативної, довідкової і методичної інформації, а також відомостей про обладнання, пристосування, інструмент та інше. Ця інформація є достатньо стабільною і зазвичай знаходиться в зовнішній пам’яті комп’ютера .

В розробленій системі **умовно-постійна інформація** поділяється на чотири складові частини: операції; переходи; пристосування; інструменти.

Опис операцій складається з наступних параметрів: код операції; найменування операції; обладнання; інструкції з техніки безпеки.

Переходи описуються такими параметрами: код переходу; зміст переходу; інструменти.

Пристосування описуються параметрами: тип пристосування; призначення; параметри.

Інструменти описуються наступними параметрами: тип інструменту; позначення; параметри.

Змінна інформація включає в себе: обладнання; пристосування; інструменти; комплектуючі; допоміжні матеріали; документи; умови контролю; норми часу; виробничі умови.

Похідна інформація формується на різних етапах проектування і стосовно САПР ТП містить відомості про маршрут обробки, технологічні операції і переходи, інструментальні наладки та інше.

В нашому випадку похідною інформацією є результати проектування, які складаються з технологічного процесу (ТП), технологічної документації, файлу з ТП та архіву ТП.

Вся умовно-постійна інформація, необхідна для функціонування САПР, представляється у вигляді бази даних. В САПР ТП база даних включає в себе масиви обладнання, інструментів, пристосувань, норми часу, формулювання операцій та переходів і інші дані.

В створеній системі використовується 15 баз даних. При її створенні використано класифікатор технологічних операцій і переходів, що встановлює коди і найменування типових операцій, коди і найменування типових переходів технологічних процесів складально-монтажного виробництва.

Інформаційне забезпечення автоматизованої системи можна представити в вигляді узагальненої схеми, що зображена на рис 6.6.

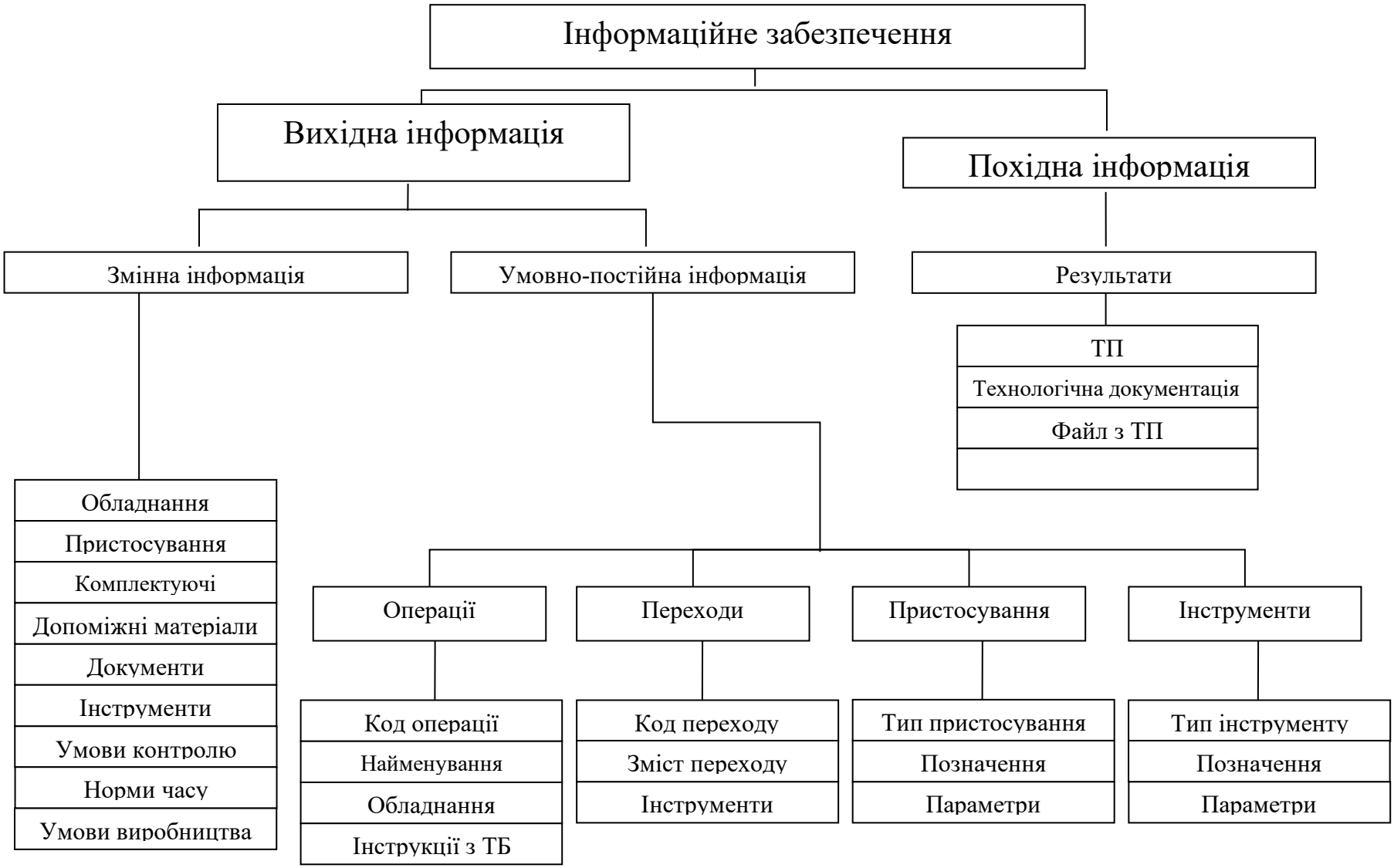


Рис. 6.6. Схема інформаційного забезпечення АСПТ МСР.

Математичне забезпечення автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт складається з трьох складових системи ADMIN, ENGINE та TMASTER.

Підсистема адміністрування ADMIN. Робота підсистеми ADMIN здійснюється за алгоритмом, який вказує порядок та послідовність дій користувача під час роботи в програмі адміністрування ADMIN.

Підсистема роботи з БД ENGINE. Робота підсистеми ENGINE здійснюється за алгоритмом, який вказує порядок та послідовність дій користувача під час роботи підсистеми з базами даних ENGINE.

Головна система автоматизованого проектування „ТехноМайстер" (TMASTER). При запуску її на виконання, розпочинається робота автоматизованої системи з проектування технологічних процесів механоскладальних та електромонтажних робіт.

Програмне забезпечення включає в себе сукупність програм загального та спеціального призначення.

Загальне програмне забезпечення призначене для планування і організації процесу обробки інформації, операцій обслуговування комп'ютера. Основою системного програмного забезпечення є операційна система. Автоматизована система проектування технології механоскладальних робіт спроектована для роботи в операційній системі Windows різних модифікацій.

Система розроблена на об'єктно-орієнтованій мові програмування Delphi. При проектуванні використовувались переваги об'єктно-орієнтованого підходу та візуального програмування, якими володіє Delphi. В якості засобу доступу до БД обрано BorlandDatabaseEngine (BDE).

В розробленій системі як **прикладне програмне забезпечення** використано відкомпільовані за допомогою компілятора системи Delphi, наступні програми: ADMIN.EXE - програма адміністрування баз даних;ENGINE.EXE – програма заповнення та редагування баз даних

нормативної інформації; TMASTER.EXE – програма проектування технологічних процесів.

Загальний вигляд програмного забезпечення представлено в вигляді схеми, яка наведена на рис.6.8.

Методичне забезпечення для автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт (АСПТ МСР) містить у собі докладний опис функцій, а також послідовність дій проектувальника при роботі в системі „ТехноМастер”.

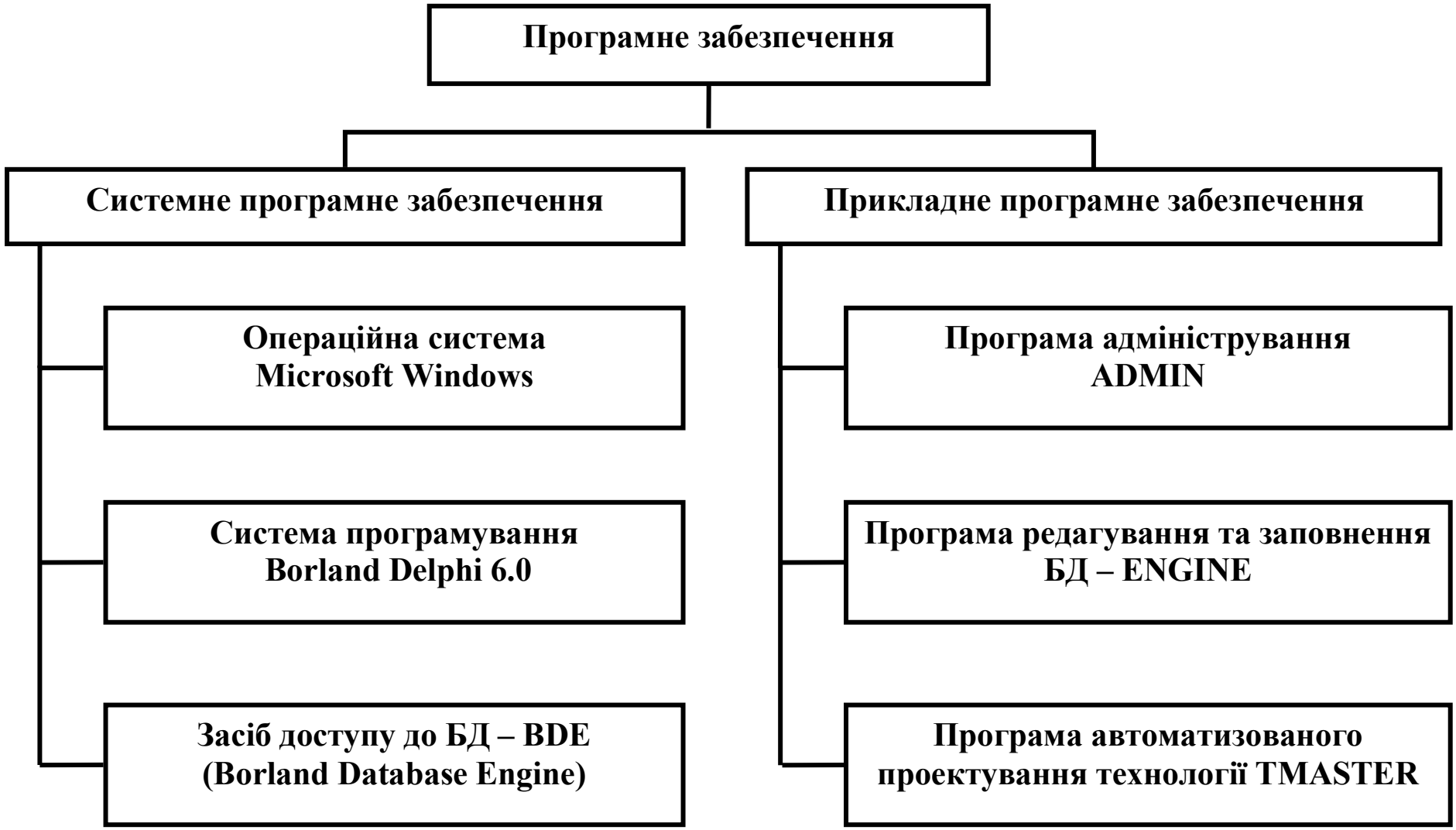


Рис.6.7. Схема програмного забезпечення системи.

Робота з програмою адміністрування ADMIN. В програмі адміністрування вказуються шляхи до фізичного розташування баз даних системи автоматизованого проектування „ТехноМайстер”, створюється спеціальний покажчик, що у подальшому сполучає роботу системи АСТП МСР з підключеними базами даних. Робота з програмою адміністрування розпочинається після запуску файлу ADMIN.EXE, шлях розміщення якого C:\TMASTER\ADMIN.EXE.

Після цього у вікні, що з'являється після запуску програми, можна створювати, видаляти покажчики, робити переадресування шляхів тощо. При першому запуску програма ADMIN має вигляд (рис. 6.8). Після створення покажчика у верхньому розділі вікна з'являться шляхи покажчика до баз даних (рис. 6.9).

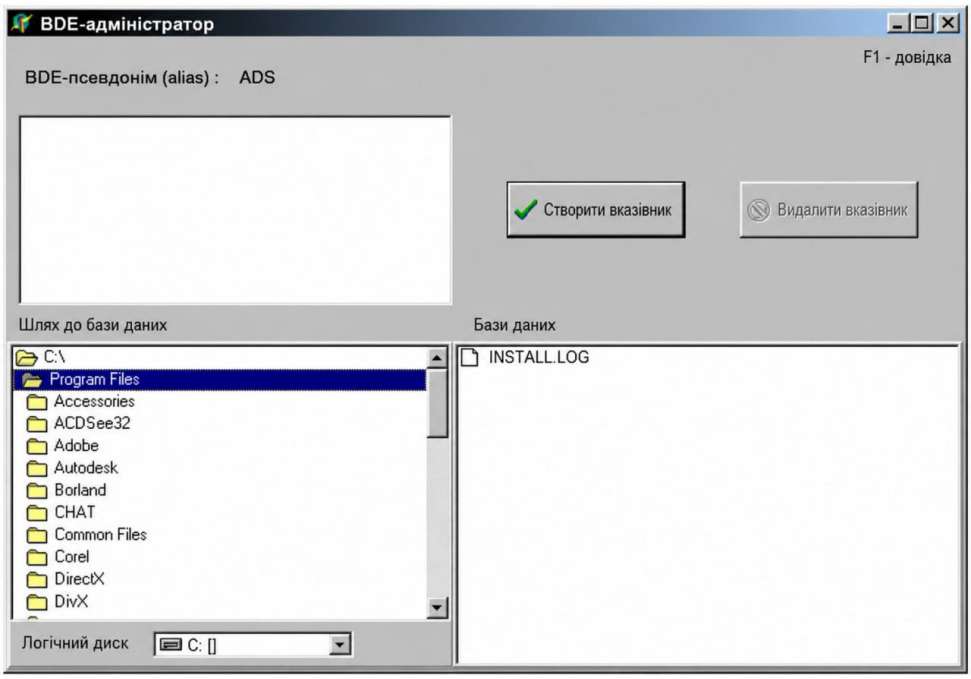


Рис. 6.8. Вікно першого запуску програми ADMIN.

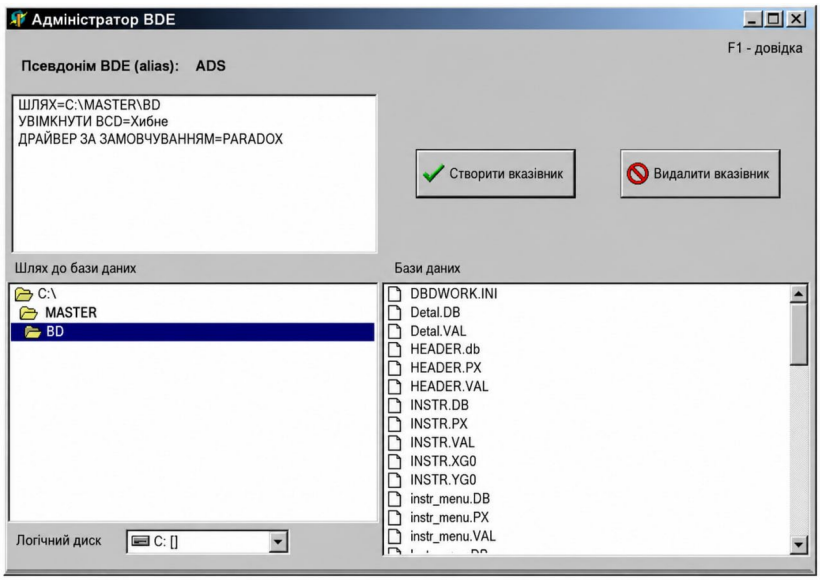


Рис. 6.9. Зміст вікна при вдалому створенні покажчика.

Робота з програмою управління базами даних ENGINE. Програма ENGINE призначена для роботи з базами даних нормативної інформації. За допомогою цієї програми є можливість додавати нові бази даних інструментів, операцій і переходів, редагувати старі бази даних (що вже є в системі) , а також робити їх видалення. Після запуску файлу ENGINE.EXE з’являється вікно в якому необхідно ввести пароль для доступу до баз даних (рис. 6.10).

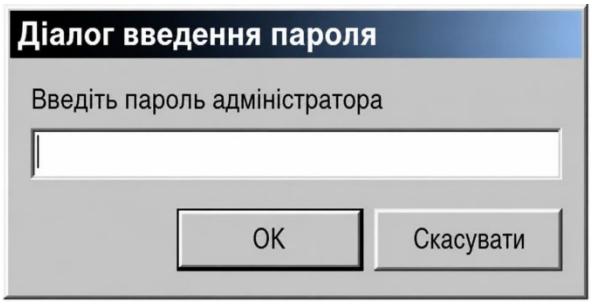


Рис. 6.10. Вікно введення паролю доступу до баз даних.

Дана опція передбачена для захисту інформації, що зберігається в базах від несанкціонованого доступу. Пароль заноситься адміністратором і може бути змінений. Якщо тричі пароль був уведений неправильно, програма припиняє роботу не завантажившись, після чого запуск необхідно зробити знову. Після правильного введення пароля з’являється головне вікно програми керування БД (рис.6.11).

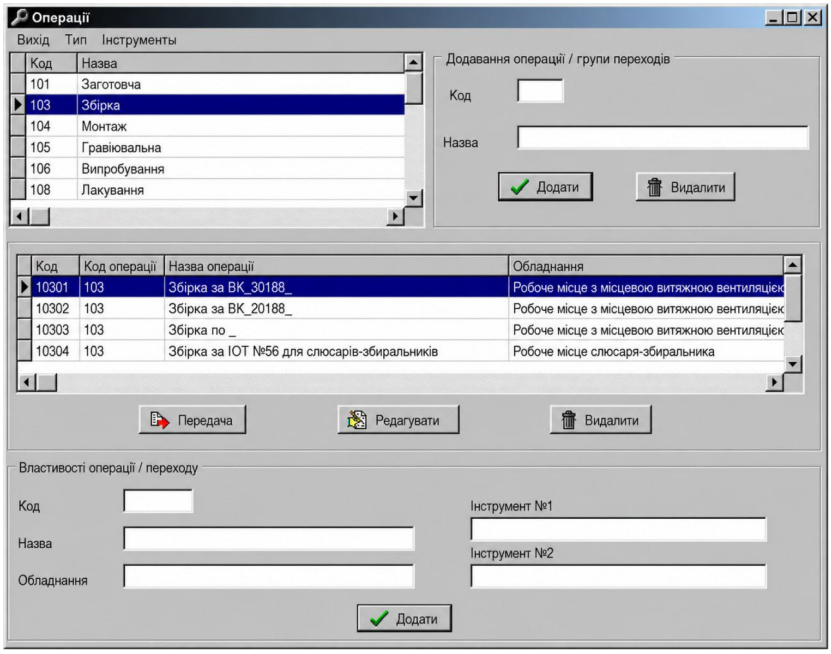


Рис. 6.11. Інтерфейс програми ENGINE при роботі з операціями БД.

Після запуску програми користувачу відразу пропонується робота з базою операцій. У верхній частині вікна є можливість додати нову операцію (вказавши код та назву), або видалити існуючу операцію. При видаленні операції, всі записи пов’язані з нею також видаляються. В нижній частині вікна є можливість добавити операцію вже з певним обладнанням та інструкціями з техніки безпеки. Для автоматизації рутинного заповнення схожих операцій існує спеціальна функція. Після виділення якоїсь стрічки зі списку в центрі екрану та натиснення на кнопку „Передача”, дані з виділеного запису переміщуються у вікна заповнення. Після цього ця інформація може бути дещо відкорегована і перезаписана (натиснути кнопку „Редагувати”), або добавлена в якості нового запису. Активація кнопки „Видалити” призводить до вилучення виділеного запису з бази даних.

Для заповнення бази даних переходів необхідно активізувати пункт меню „Тип” і обрати в підменю „Переходи” (рис. 6.12).

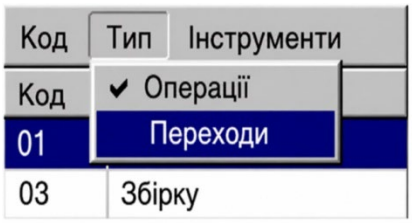


Рис. 6.12. Відображення пункту зміни режиму для роботи з базою переходів.

Після відкриття вікна роботи з переходами стають доступні ті ж можливості, що при роботі з операціями. Для інтуїтивності інтерфейс взаємодії з користувачем не змінюється (рис. 6.13).

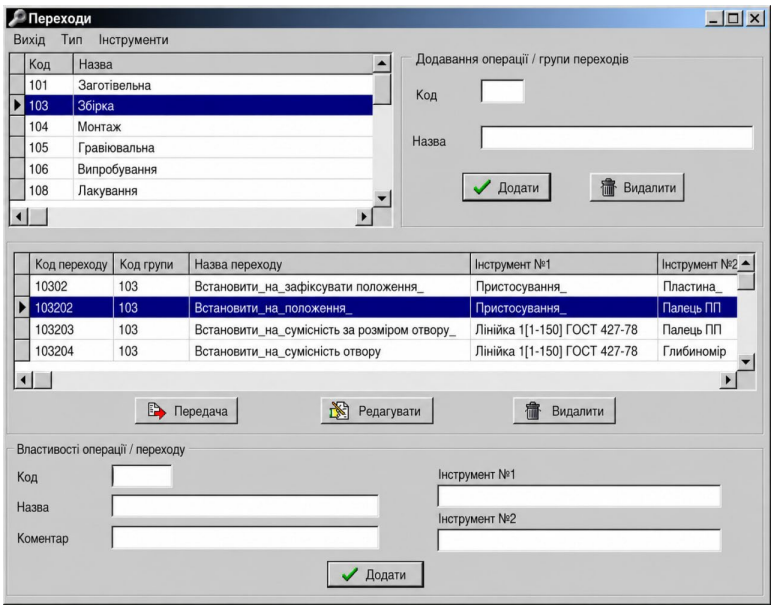


Рис. 6.13. Інтерфейс роботи з записами переходів.

Для доступу до бази інструментів та пристосувань необхідно вибрати пункт меню „Інструменти”. Після цього з’явиться вікно управління базою даних інструментів (рис. 6.14).

Дані цієї бази даних пов’язані між собою в певній ієрархії (Категорія –> Тип – > Інструмент). Саме в цьому порядку й необхідно заповнювати базу даних. Видалення запису якоїсь ступені спричинить також видалення записів нижчої ступені, які до неї входять.

Для того, щоб вийти з режиму редагування бази даних інструментів необхідно закрити вікно „Інструменти”, натиснувши кнопку у верхньому правому куті з зображенням „Х”. Після цього буде активовано попереднє вікно.

Для завершення роботи з програмою ENGINE треба вибрати пункт меню „Вихід” та підтвердити намір виходу з програми.

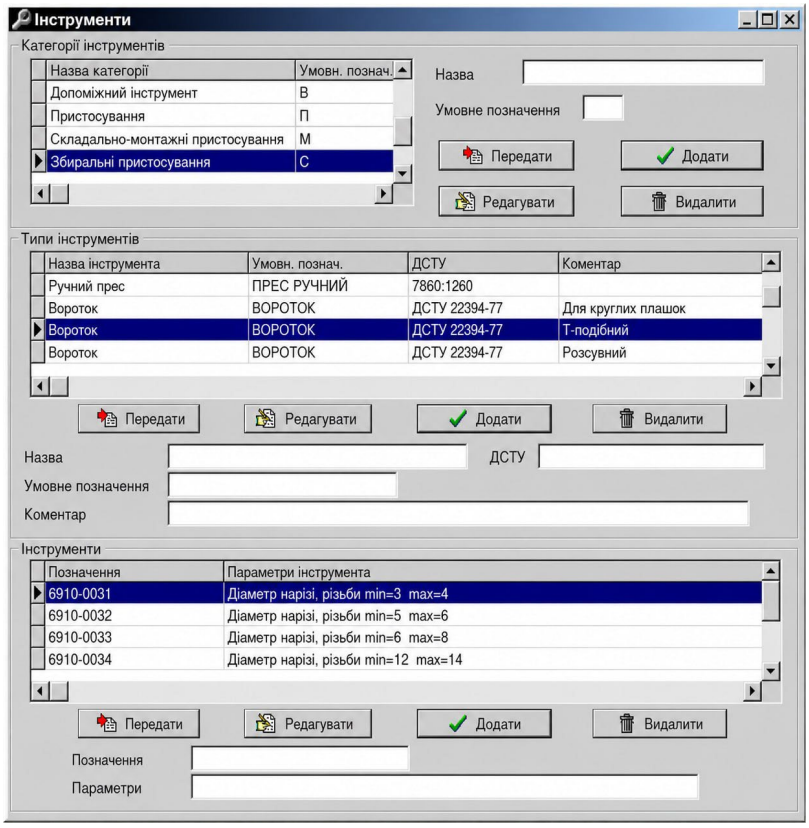


Рис. 6.14. Вікно роботи з базою інструментів.

Робота проектувальника в системі АСПТ МСР „ТехноМайстер”. Після запуску програми TMASTER.EXE відкривається головне меню системи (рис.6.15).

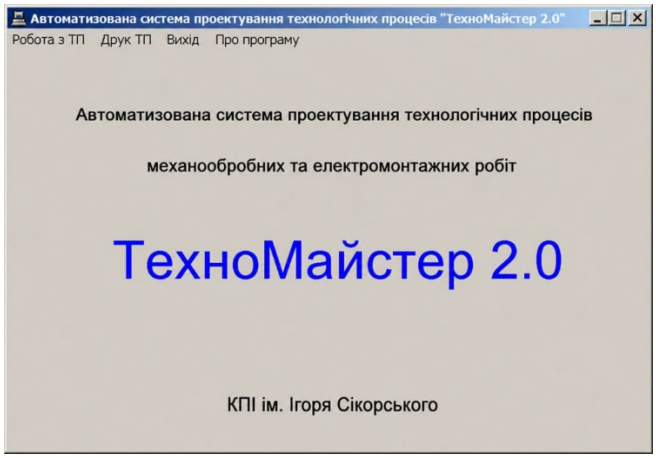


Рис.6.15. Вікно системи „ТехноМайстер”.

Головне меню системи має такі розділи:

– „Робота с ТП” - робота з технологічними процесами (перегляд, створення, коректування, видалення та ін.);

– „Друк ТП” - створення звіту по існуючому ТП;

– „Вихід” - вихід із програми;

– „Про програму” - інформація про програму і розроблювачів.

Після вибору розділу „Робота с ТП” отримаємо підменю цього розділу (рис. 6.17). При активізації цього вікна є можливість працювати з наступними розділами, для виконання різноманітних операцій над ТП:

„Створити ТП” - створення нового технологічного процесу;

„Відкрити ТП” - перегляд і редагування раніше створених ТП (гаряча клавіша – F3);

„Видалити ТП” - видалення ТП з бази даних;

„Експорт / Імпорт” - експорт / імпорт ТП.

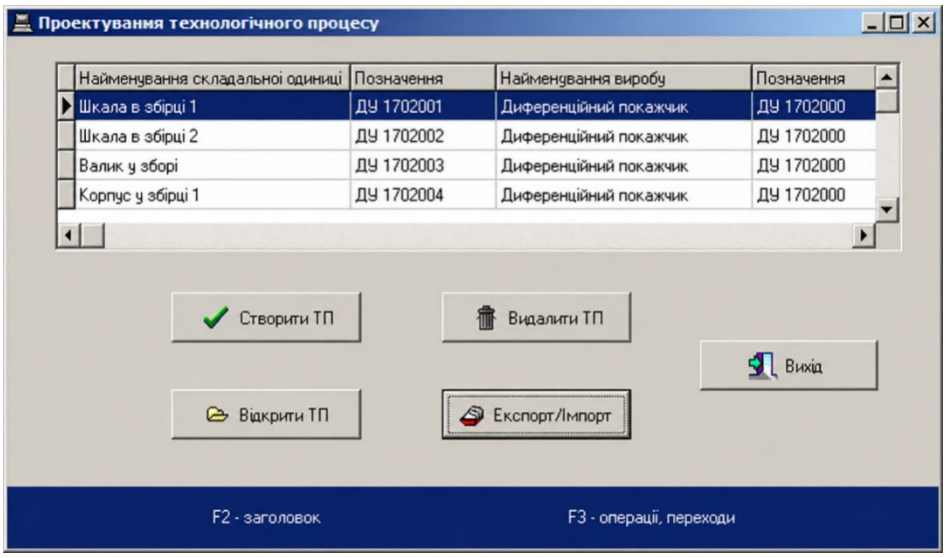


Рис. 6.16. Вікно роботи з технологічними процесами.

У переліку відображені технологічні процеси, що були раніше створені. Перед тим як робити які-небудь дії над ТП, треба вибрати зі списку необхідний запис і натиснути лівою кнопкою мишки на одну з функціональних кнопок. Для введення заголовку технологічного процесу - натиснути на клавішу „F2” (рис. 6.17).

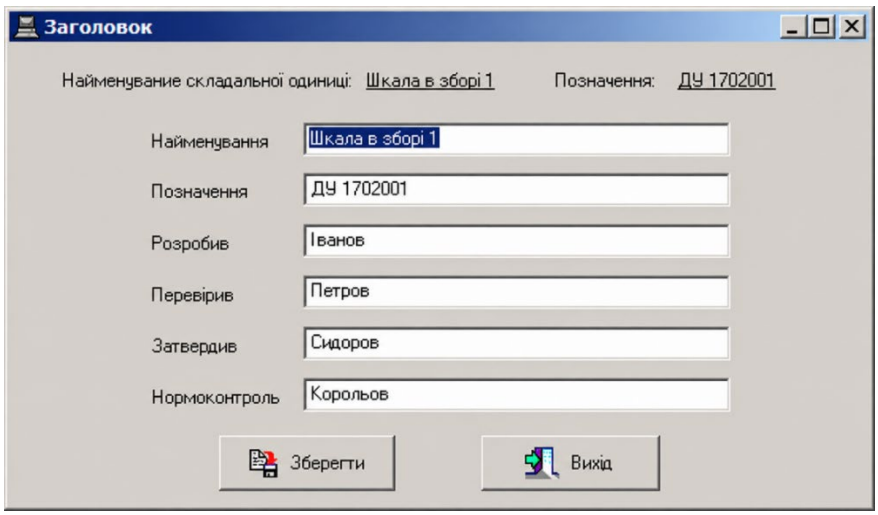


Рис. 6.17. Вікно введення заголовку ТП.

Після натискання клавіші з надписом „Створення ТП” проектувальнику пропонується створити новий технологічний процес (рис. 6.18).

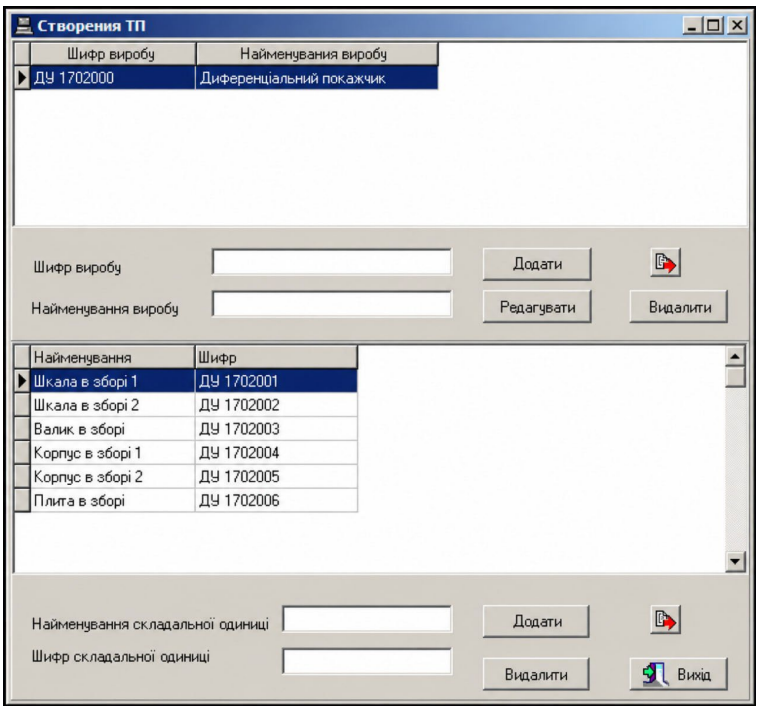


Рис. 6.18. Вікно створення нового технологічного процесу.

В вікні створення нового ТП треба заповнити поля „Позначення детали” і „Шифр виробу” відповідною інформацією та натиснути кнопку „Створити”. В результаті цього до переліку існуючих ТП додається запис щойно створеного технологічного процесу.

Після цього необхідно закрити вікно для створення ТП та відкрити новий розділ автоматизованої системи проектування під назвою „Відкрити ТП” (рис.

6.19). За допомогою цього вікна є можливість виконувати різні дії з операціями та переходами. Для зручності виконання цих дій у верхній частині вікна відображаються найменування деталі і виробу.

Для того, щоб створити нову операцію, треба встановити мітку напроти пункту „Створити нову операцію” і натиснути кнопку з надписом „ОК”.

Для створення переходу треба встановити мітку біля пункту „Створити новий перехід” і натиснути клавішу „ОК”.

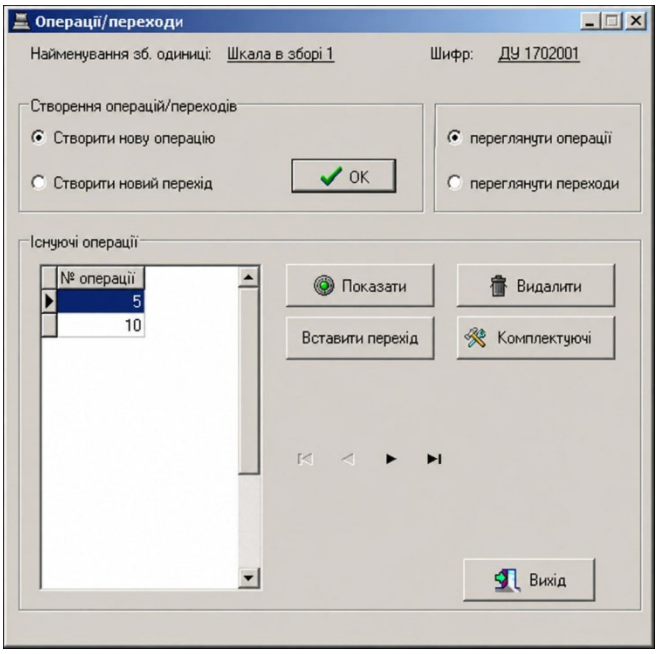


Рис. 6.19. Вікно роботи з операціями та переходами.

У нижній частині цього вікна відображається перелік наявних операцій. Для перегляду вмісту операції необхідно встановити мітку напроти пункту „Оглянути операції», вибрати з переліку необхідну операцію і натиснути на кнопку з надписом „Показати”. Аналогічні дії виконуються для перегляду переходу (мітка встановлюється біля пункту „Оглянути переходи”). Навігація по переліку операцій та переходів здійснюється за допомогою смуги прокручування або спеціальних кнопок переміщення по запису (в початок, на один крок назад, на один крок вперед, в кінець).

Для того, щоб видалити перехід, треба вибрати з переліку необхідний запис і натиснути кнопку „Видалити”. Видалення операції виконується

аналогічно (при видаленні операції автоматично видаляються всі переходи, що у неї входять).

Активізація кнопки «Вставити перехід» призводить до вставки переходу між існуючими переходами (перехід вставляється перед виділеним у переліку переходом).

При створенні нової операції, є можливість вибрати потрібну операцію з переліку (рис. 6.20). Для цього треба виділити необхідну операцію та підтвердити свій вибір, натиснувши на кнопку „ОК”.

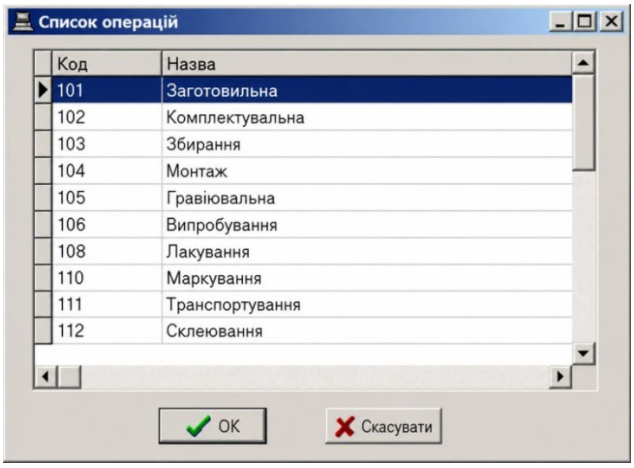


Рис. 6.20. Вікно вибору операції.

Після цього відкривається вікно з полями для запису та редагування змісту операцій (рис. 6.21).

Проектувальнику ТП надається можливість редагувати інформацію у всіх наявних полях. Для цього необхідно установити курсор у відповідне поле і внести необхідні зміни та записати внесені зміни, вибравши в меню пункт „Запис” (альтернативна комбінація клавіш Ctrl+S) і підтвердити збереження запису.

Поля „Пристосування” можуть бути заповнені даними з наявної бази. Щоб викликати список наявних пристосувань та інструментів, необхідно помістити курсор в одне з п’яти полів „Пристосування” і натиснути комбінацію клавіш Ctrl+F2. Після цього відкриється наступне меню (рис. 6.22).

Після підтвердження вибору категорії (кнопка „ОК”) відкриється вікно вибору типу інструменту чи пристосування (рис. 6.23).

Якщо необхідного пристосування немає в базі даних, то треба ввести назву цього пристосування вручну, визначити його категорію і безпосередньо перед його назвою вказати тип даної категорії (одна літера, наприклад С – складальні пристосування, М – слюсарно-монтажні пристосування тощо), наприклад, У,Державка,6640-0031. Вищевказаний формат запису необхідний для коректного відображення пристосувань при формуванні технологічних карт.

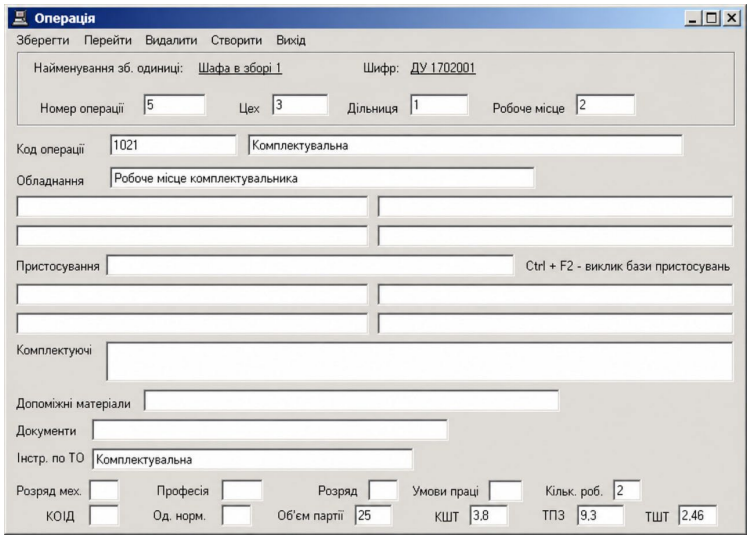


Рис. 6.21. Вікно роботи з операціями.

Для того, щоб здійснити перехід до наступних чи попередніх операцій або переходів необхідно в меню вибрати „Перехід → Назад” чи „Перехід → Вперед”. Тут можна використовувати гарячі клавіші навігації: F2 – попередній перехід або операція, F3 – наступний перехід або операція.

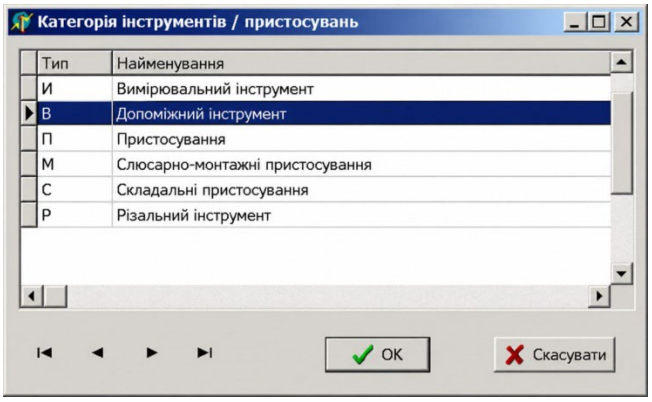


Рис. 6.22. Вікно вибору пристосувань та інструментів.

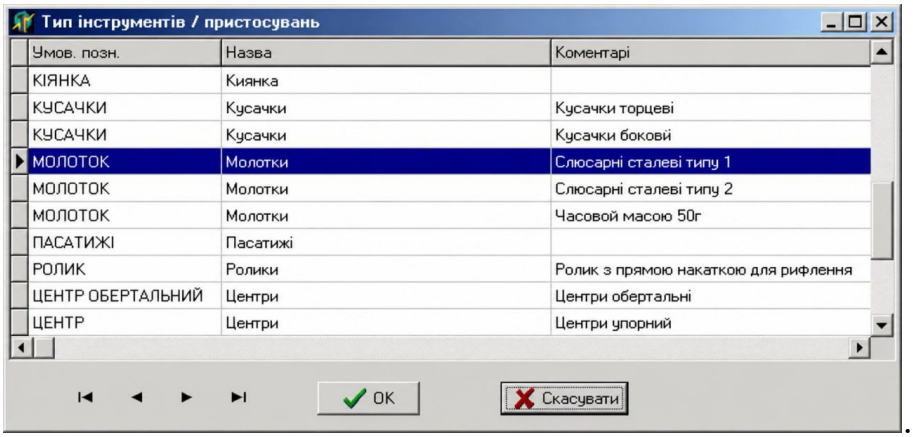


Рис. 6.23. Вікно вибору типу інструменту та пристосувань.

Для видалення операції з проекту необхідно вибрати з меню пункт „Видалити”. При видаленні операції всі переходи, що містяться в ній, також будуть вилучені.

Опція меню „Вихід” призведе до переходу з режиму перегляду або редагування операції в перелік наявних операцій і переходів (вікно „Операції / переходи” – рис. 6.24).

Після встановлення покажчика у вікні „Операції / переходи” на розділ “Створити новий перехід” буде запропоновано вибрати для якої саме операції створювати перехід (рис. 6.24).

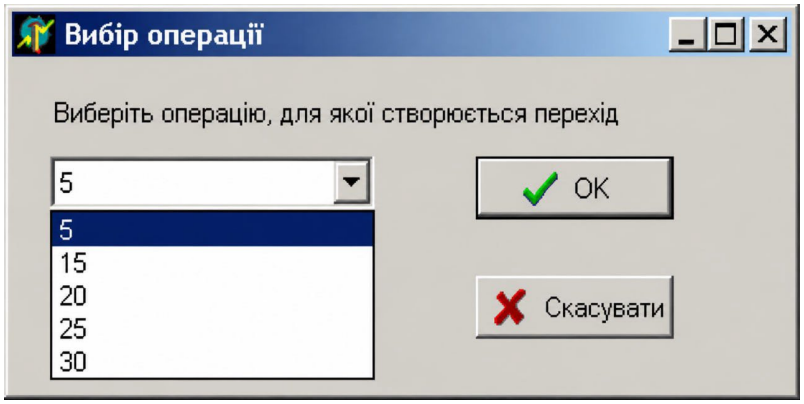


Рис. 6.24. Вікно вибору операції при створенні переходу.

Обравши необхідну операцію натиснути клавішу з надписом „ОК”, після чого потрапляємо у вікно списку переходів для кожної окремої операції (рис. 6.25).

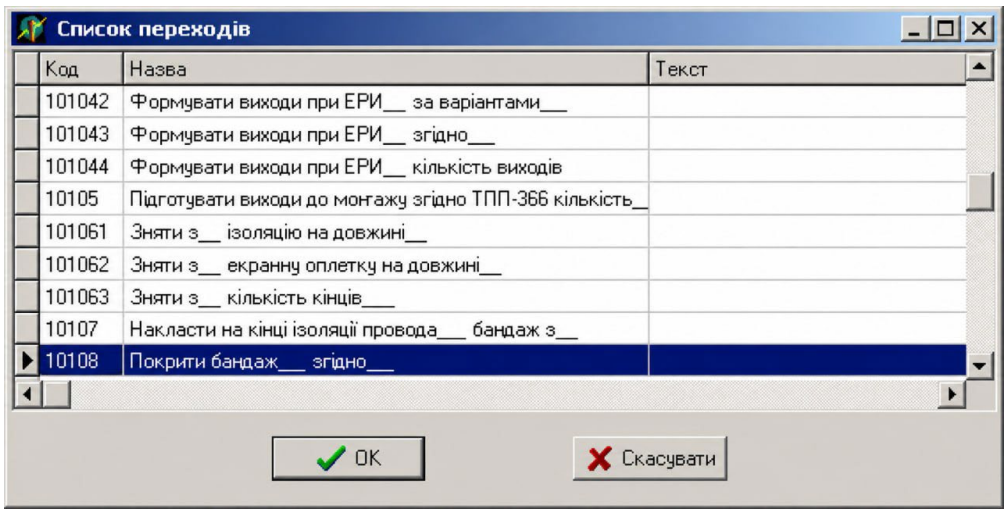


Рис. 6.25. Вікно вибору переходів.

При натисканні клавіші „ОК” на вибраному зі списку переходу відкривається вікно відображення та редагування змісту поточного переходу (рис. 6.27), в яке заносяться нормативні дані.

Тут є можливість редагувати інформацію у всіх наявних полях. Для цього необхідно встановити курсор у відповідне поле і внести необхідні зміни. Далі необхідно записати внесені зміни, вибравши в меню пункт „Запис” (альтернативна комбінація клавіш Ctrl+S) і підтвердити збереження запису. Після редагування необхідно зробити запис, інакше змінені дані не будуть збережені.

Поля „Інструмент” можуть бути заповнені даними з наявної бази інструментів.

Для того, щоб вивести перелік наявних в базі інструментів, необхідно помістити курсор в одне із семи полів „Інструмент” і натиснути комбінацію клавіш Ctrl+F2. Якщо необхідного інструмента не виявилося в базі даних, то необхідно ввести його вручну, визначити його категорію і безпосередньо перед назвою інструмента вказати тип даної категорії (одна літера, наприклад І – вимірювальний інструмент, В – допоміжний інструмент тощо), наприклад: І,ЦИРКУЛЬ,7842-0023.

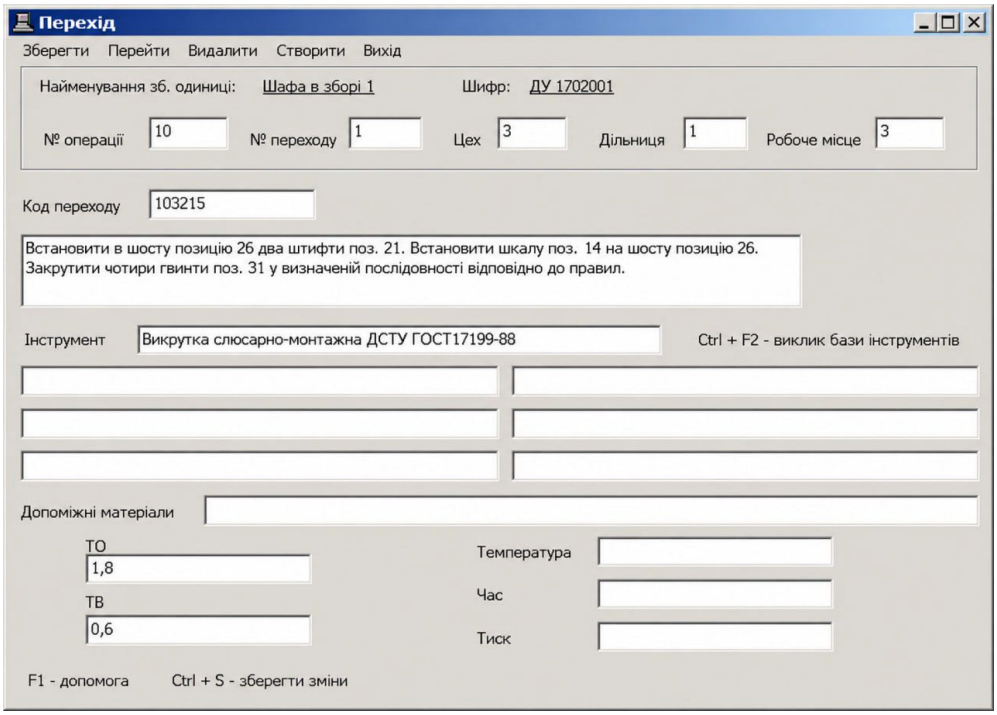


Рис. 6.26. Вікно роботи з переходами.

Для того, щоб здійснити перехід до наступних чи попередніх операцій або переходів необхідно в меню вибрати „Перехід → Назад” чи „Перехід → Вперед”. Тут також можна використовувати гарячі клавіші навігації: F2 – попередній перехід або операція, F3 – наступний перехід або операція.

Для видалення переходу з проекту необхідно вибрати з меню пункт „Видалити”. Опція меню „Вихід” призведе до переходу з режиму перегляду або редагування переходу в перелік наявних операцій і переходів (вікно „Операції / Переходи” – рис. 6.20).

З меню „Проєктування ТП” (рис. 6.19) є можливість виконувати дії експорту та імпорту ТП (рис. 6.28).

Для того, щоб експортувати ТП в окремий файл, необхідно вибрати з переліку необхідний технологічний процес і натиснути кнопку „Експорт ТП”. Після підтвердження цієї операції необхідно вказати ім'я файлу, в якому розміститься вся інформація поточного технологічного процесу (рис. 6.28).

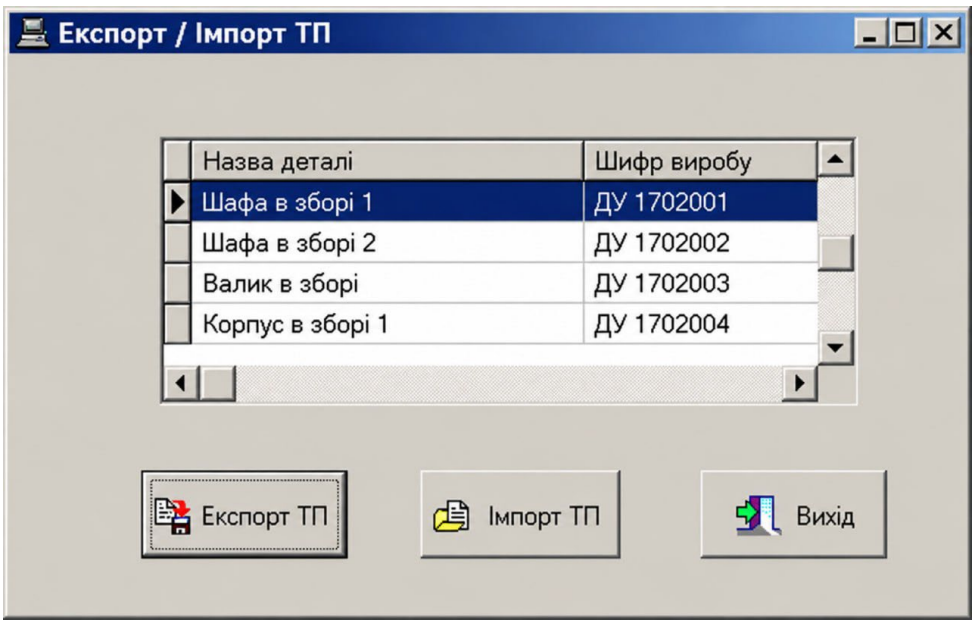


Рис. 6.27. Вікно експорту та імпорту ТП.

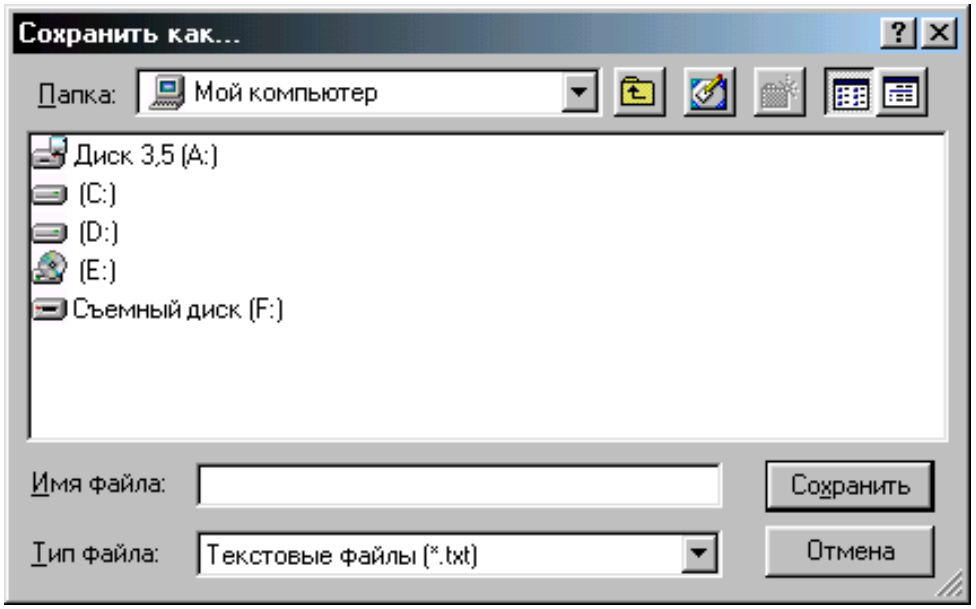


Рис. 6.28. Вікно вказання файлу для експорту ТП.

Для імпортування ТП із файлу необхідно натиснути кнопку з надписом „Імпорт ТП”. Далі необхідно вказати файл, у якому знаходиться потрібний ТП (експортований раніше) (рис. 6.29).

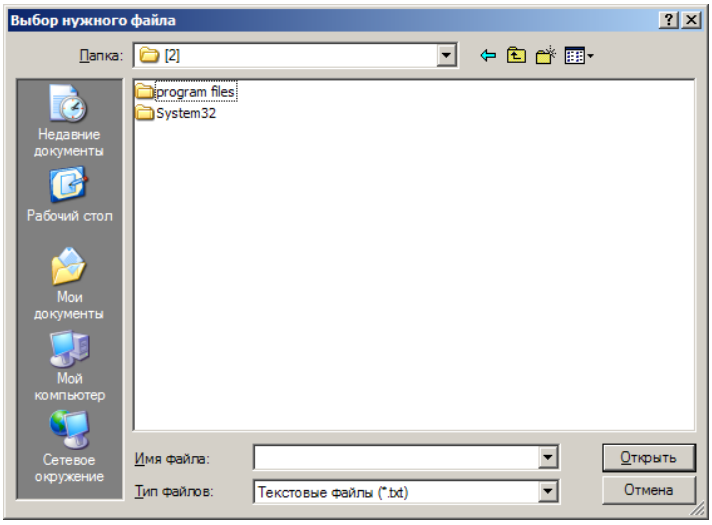


Рис. 6.29. Вікно вибору файлу для імпортування.

Після імпортування ТП він з'явиться в переліку існуючих файлів. Якщо проводиться імпортування проекту, що вже є в базі, то програма повідомить користувача, що застаріли дані будуть заміщені інформацією з імпортованого файлу.

Для формування маршрутних карт технологічного процесу необхідно в головному вікні програми (рис. 6.15) обрати пункт меню „Друк ТП” (рис. 6.30).

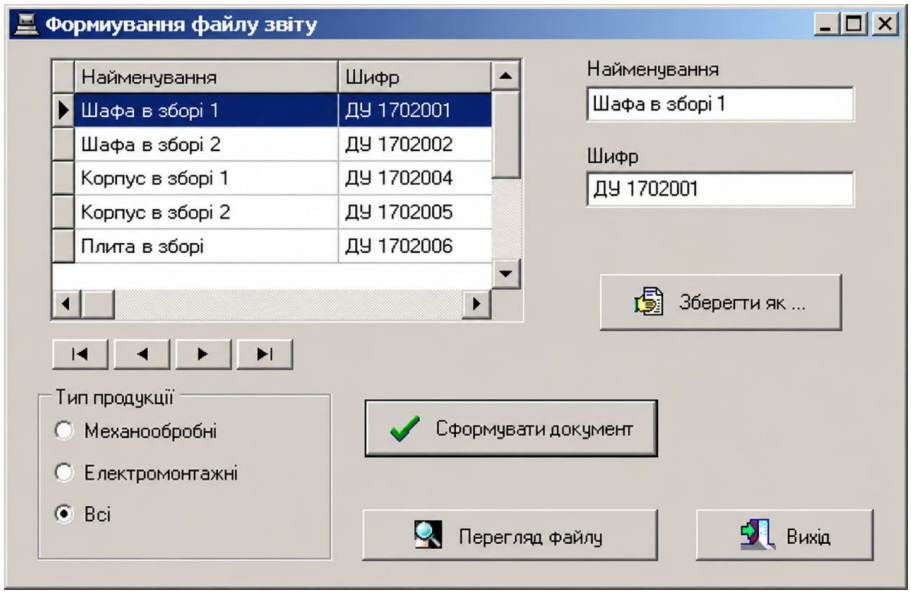


Рис. 6.30. Вікно формування технологічної документації.

Після вибору ТП, для якого необхідно створити документацію, необхідно натиснути кнопку „Зберегти як…” та вказати назву файлу в який буде записано

маршрутні карти технологічного процесу, а потім натиснути на кнопку „Сформувати документ”. Після цього документ буде сформований у вказаному текстовому файлі.

У головному меню автоматизованої системи проектування можна також отримати інформацію о розроблювачах цієї автоматизованої системи проектування технології механоскладальних та електромонтажних робіт (вибір пункту меню „Про програму”).

6.5. Віртуальне складання виробу та формування вихідної технологічної документації

Використання автоматизованої системи проектування механоскладальних робіт буде мати найбільший ефект в комплексних системах проектування конструкції виробів та технологічних процесів їх виробництва. Тому рекомендується здійснювати віртуальне комп’ютерне складання виробів з одночасним формуванням вихідної технологічної документації. Для цього доцільно використати одну із промислових систем твердотільного проектування конструкції виробів, наприклад, SolidWorks.

Процес проектування технології складання виробів реалізується в відповідності з наведеною в додатку О послідовністю проектування за допомогою системи „ТехноМайстер”.

На початку процесу проектування завантажуються системи SolidWorks та „ТехноМайстер”. При цьому з’являються головні вікна вказаних систем.

З метою створення нового файлу складання в системі SolidWorks виконується наступна послідовність дій : „Файл → Створити → Збірка”. Для створення тривимірної моделі приладу доцільно використовувати різноманітні способи додавання компонентів у складання.

Аналогічно можна додавати в виріб раніше спроектовані складальні одиниці. Для додавання стандартних виробів з бібліотеки стандартних виробів використовується команда „Вставлення → Автокріплення”. Для видалення компонент з моделі виробу, треба натиснути правою кнопкою миші на назві

компонента у дереві проектування, та, у вікні, яке з'явилось обирати пункт „Видалити". В дереві конструювання біля назви компонентів може бути присутнє позначення (префікс), яке є інформацію про його взаємозв'язок з іншими компонентами. Відсутність префіксу означає, що положення компоненти повністю визначено.

При зберіганні результатів складання шлях та ім'я кожної компоненти з посиланням зберігаються в документі складання. З цієї причині необхідно завжди бути обережним при зберіганні або перейменуванні документу компоненти, а також при переміщення його в іншу папку.

При розробці технології механоскладальних робіт на конкретний виріб за допомогою програми SolidWorks здійснюється попереднє його віртуальне складання. Після відлагодження цього процесу та перевірки якості складання складений виріб розбирається, а далі виріб знову послідовно складається на екрані монітору, при цьому вносяться необхідні операції та переходи, обладнання, інструмент та пристосування в технологічний процес, який формує система „ТехноМастер". Таким чином, перемикаючи вікна програм є можливість одночасно відтворювати процес складання та формувати технологічний процес.

Аналіз технологічних процесів складання дозволив визначити основні задачі автоматизації проектування технології механоскладальних робіт та формалізації процесу проектування технології складання виробів.

Виконаний аналіз інформаційних зв'язків та враховані особливості технології складання виробів приладобудування дозволив розробити основи класифікації та групування, створити алгоритм класифікації та інформаційну модель технологічних процесів механоскладальних робіт.

Розроблені інформаційні моделі виробів приладобудування та технології їх складання дозволяють створити узагальнені маршрути складання приладів відповідної класифікаційної групи та представити алгоритм формування операцій складання конкретного приладу.

Розв'язання задач класифікації та групування виробів приладобудування,

побудови інформаційної моделі технологічного процесу складання дозволяє створити автоматизовану систему проектування технології механоскладальних робіт АСПТ МСР. Для цього розроблені структурна та функціональна схеми, інформаційне, математичне, програмне та методичне забезпечення автоматизованої системи.

Розробка автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт „ТехноМайстер” дозволяє суттєво скоротити час підготовки технологічної документації (маршрутних карт), а також підвищити якість оформлення даної документації.

Використання автоматизованої системи дозволяє зберігати в електронному вигляді (в базі даних системи) раніше створені технологічні процеси і при необхідності неодноразово їх використовувати.

Функціональна схема створеної АСП МСР дозволили реалізувати функцію відокремлення технологічного процесу із загальної бази даних та перенесення його для подальшої розробки, корегування або перевірки.

Використання модульного принципу при розробці системи „ТехноМастер” дозволяє при незначній доробці пристосувати її для розробки технології інших видів складальних робіт.

Перевагою створеної автоматизованої системи є те, що вона не потребує значних ресурсів комп’ютера, має інтуїтивний інтерфейс, тому з легкістю може бути опанована рядовим користувачем комп’ютера без спеціальної підготовки.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть етапи проектування технології механоскладальних робіт
2. Які вимоги висуваються до точності складання приладів?
3. Які фактори впливають на якість складання виробів?
4. Які задачі вирішуються при автоматизованому проектуванні технології?
5. Надайте переваги автоматизації технологічного проектування.
6. Які математичні методи використовуються для моделювання складальних робіт?

7. Які методи оптимізації застосовуються в технології складання?
8. Які переваги цифрового складального виробництва у приладобудуванні?
9. Які задачі вибору технологічного обладнання при складанні виробу вирішуються автоматизовано?
10. Як виконується автоматизується вибір технологічного оснащення?
11. Як здійснюється автоматизований вибір режимів складання?
12. Наведіть методи аналізу технологічності використовуються.
13. Як автоматизуються розрахунки складальних розмірних ланцюгів?
14. Які інформаційні моделі використовуються в автоматизованих системах?
15. Які програмні засоби використовуються для автоматизації проектування складальних робіт?
16. Яка роль інформаційних технологій у підвищенні якості складання?
17. Надайте мету формалізації технології складання.
18. Які параметри враховуються при формалізації складання?
19. Вкажіть методи формалізації використовуються у приладобудуванні.
20. Наведіть переваги формалізованого опису процесу складання.
21. Які математичні моделі використовуються для опису складання?
22. Як здійснюється кодування технологічної інформації?
23. Наведіть вимоги висуваються до інформаційної моделі складання.
24. Що таке база знань технологічної системи?
25. Які програмні засоби підтримують формалізацію?
26. Як оцінюється адекватність формалізованої моделі?
27. Наведіть методи прогнозування якості складання.
28. Вкажіть сутність класифікація виробів приладобудування.
29. Наведіть мету групування виробів.
30. Які класифікаційні ознаки використовуються?
31. Вкажіть методи класифікації виробів у приладобудуванні?
32. Вкажіть сутність групової технології.
33. Як класифікація впливає на автоматизацію проектування?
34. Які труднощі виникають при класифікації складних виробів?

35. Вкажіть використовувані методи кодування виробів
36. Які інформаційні системи підтримують класифікацію?
37. Як здійснюється формування технологічних груп?
38. Наведіть використовувані критерії подібності виробів.
39. Які задачі оптимізації вирішуються шляхом групування?
40. Які програмні засоби використовуються для класифікації?
41. Як оцінюється ефективність класифікації?
42. Які сучасні методи аналізу даних використовуються для групування?
43. Які перспективи розвитку цифрових класифікаційних систем?
44. Що таке інформаційна модель виробу?
45. Наведіть мету створення інформаційної моделі виробу.
46. Як інформаційна модель використовується в автоматизованому проектуванні?
47. Які програмні засоби застосовуються для створення моделей?
48. Наведіть сутність параметричного моделювання виробу.
49. Як забезпечується актуальність інформаційної моделі?
50. Як оцінюється адекватність інформаційної моделі?
51. Вкажіть переваги цифрового опису виробу.
52. Яка роль CAD/CAM систем у створенні моделей?
53. Наведіть перспективи використання цифрових двійників в складальному виробництві.
54. Які сучасні технології використовуються для інформаційного моделювання?
55. Наведіть структуру автоматизованої системи проектування механоскладальних робіт.
56. Вкажіть функції системи автоматизованого проектування.
57. Які інформаційні технології використовуються в системах проектування?
58. Які бази даних використовуються у САПР?
59. Які математичні моделі реалізуються в автоматизованій системі?
60. Які програмні засоби використовуються для проектування складання?

61. Як забезпечується інтеграція CAD/CAM/CAE систем?
62. Як оцінюється ефективність автоматизованої системи механоскладальних робіт?
63. Які вимоги висуваються до програмного забезпечення САПР?
64. Які сучасні технології використовуються у проектуванні складання?
65. Вкажіть переваги цифрового складального виробництва у приладобудуванні?
66. Наведіть сутність віртуального складання виробу.
67. Яка мета використання віртуального складання?
68. Які переваги має віртуальне моделювання процесів складання?
69. Вкажіть етапи віртуального складання виробу.
70. Які програмні засоби використовуються для віртуального складання?
71. Що таке цифровий двійник виробу?
72. Як віртуальне складання впливає на якість проектування?
73. Як здійснюється контроль взаємодії деталей у віртуальному середовищі?
74. Як автоматизується формування маршрутних карт?
75. Які стандарти використовуються при оформленні технологічної документації?
76. Які бази даних використовуються при формуванні документації?
77. Як оцінюється ефективність віртуального складання?
78. Які переваги має цифрове формування документації?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андруник, Василь Адамович. Чисельні методи в комп'ютерних науках : навчальний посібник / В.А. Андруник, В.А. Висоцька, В.В. Пасічник, Л.Б. Чирун, Л.В. Чирун ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка".– Львів : Видавництво "Новий Світ–2000", 2023.2 томи :том 1–469 с.,том 2–536 с.

https://discovery.kpi.ua/Record/000642675

2.Баженов, Віктор Андрійович. Інформатика. Комп'ютерна техніка. Комп'ютерні технології:підручник для студентів вищих навчальних закладів /авторський колектив: В.А. Баженов, П.П. Лізунов, А.С. Резніков, С.О. Кравчук [та 7 інших];Львівський національний університет імені Івана Франка, Київський національний університет будівництва і архітектури, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Національний університет "Львівська політехніка". Комп'ютерна техніка Комп'ютерні технології Сьоме видання. Київ :Каравела,2022.–495 с. https://discovery.kpi.ua/Record/000642630

3. Білущак, Галина Іванівна. Аналітичні та чисельні методи досліджень : статистичні методи в OpenOffice : навчальний посібник для аспірантів усіх спеціальностей / Б.І. Білущак ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Растр–7, 2017. – 181 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000584965&local_base=KPI01

4. Варенко, Володимир Михайлович. Моделювання інформаційних процесів :навчальний посібник /В.М. Варенко, В.В. Кушнарьов, В.В. Касьян. – Київ :Видавництво Ліра-К, –265 с.– 2025.

https://discovery.kpi.ua/Record/000647545

5. Вітлінський В.В., Наконечний С.І., Терещенко Т.О. Математичне програмування: Навч.-метод. Посібник для самост. вивч. дисц. – К.: КНЕУ, 2001. – 248 с.

6.Виклюк, Ярослав Ігорович. Моделювання складних систем : навчальний посібник / Я.І. Виклюк, Р.М. Камінський, В.В. Пасічник ; Міністерство освіти і науки України. – Львів : Новий Світ-2000, 2025. – 403 с. https://discovery.kpi.ua/Record/000648016

7. Воронцов, Б.С. Комп'ютернемоделюваннятехнологічнихпроцесів [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» за освітньо-науковою програмою магістерської підготовки– Технологія машинобудування / Б. С. Воронцов, Ю. М. Бецко, О. О. Мельник ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 186 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53776

8. Вислоух, С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва [Електронний ресурс] : монографія / С. П. Вислоух ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові данні (1 файл: 15,47 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 482 с: https://ela.kpi.ua/items/a1a26c44-53c0-4c3c-b535-babf743ef9d7

9. Глушик, Михайло Михайлович. Математичне програмування : підручник / М.М. Глушик, І.М. Копич, В.М. Сороківський. - Львів : Видавництво "НовийСвіт-2000", 2023. 276 с. https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000642697&local_base=KPI01

10.Губарев, В'ячеслав Федорович. Моделювання та ідентифікація складних систем :монографія /В.Ф. Губарев ; Національна академія наук України, Держав некосмічне агентство України, Інститут космічних досліджень.–Київ :Наукова думка, 2019.–246 с.

https://discovery.kpi.ua/Record/000604772

11. Графи, які нструмент моделювання складних об’єктів та систем [Електроннийресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / КПІім. Ігоря

Сікорського ; уклад.: О. А. Жученко, Т. А. Дунаєва, – Київ :КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 68 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/43477

12. Добровська, Людмила Миколаївна. Теорія та практика нейронних мереж : навч. посіб. для студ. вищих навч. закл., які навчаються за освітньо-професійною програмою підготовки спеціалістів та магістрів зі спеціальності "Інформаційні управляючі системи та технології" / Л.М. Добровська, І.А. Добровська ; М-во освіти і науки України, НТУУ "КПІ". – Київ : НТУУ "КПІ", 2015. – 394 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000482206&local_base=KPI01

13.Дубовой В. М. Моделювання та оптимізація систем: підручник/ В. М. Дубовой, Р. Н. Квєтний, О. І.Михальов, А. В. Усов – Вінниця: ПП «ТДЕдельвейс», 2017. – 804. с. ISBN 978-617-7237-23-4.

14..Доленко, Галина Олександрівна. Прикладні проблеми теорії прийняття рішень :навчальний посібник /Г.О. Доленко ; Міністерство освіти і науки України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.– Київ :ВПЦ "Київський університет",2023.–95 с. https://discovery.kpi.ua/Record/000647317

15. Зайченко О.Ю., Зайченко Ю.П. Дослідженняоперацій. Збірник задач. – К.: Видавничийдім «Світло», 2007. – 472 с.

16. Згуровський, Михайло Захарович. Системи і методи штучного інтелекту :підручник /М.З. Згуровський, Ю.П. Зайченко ; Національна академія наук України, Навчально-науковий комплекс "Інститут прикладного системного аналізу" КПІ імені Ігоря Сікорського. – Київ: Видавництво "Академперіодика", 2025. – 741 с. https://discovery.kpi.ua/Record/000648148

17. Зеленський, Кирило Харитонович. Комп'ютерне моделювання систем : навч. посіб. / К.Х. Зеленський, Г.В. Кіт, О.І. Чумаченко ; Мін-во освіти і науки України, Відкритий міжнародний ун-т розвитку людини "Україна". –Київ : Україна, 2014. – 314 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000399401&local_base=KPI01

18. Комп'ютерне моделювання: процеси і системи: підручник [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. ІгоряСікорського ; уклад. : І. В. Кравченко, І. В. Микитенко, Г. С. Тимчик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 215 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48860

19. Комп’ютерне моделювання процесів та систем. Частина 1 [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” / М. Д. Гераїмчук, Т. О. Толочко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48810

20. Комп’ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи [Електронний ресурс] : підручник для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / С. П. Вислоух, О. В. Волошко, Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 228 с.

https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42195

21. Комп’ютерне моделювання процесів і систем. Методи оптимізації [Електронний ресурс] : підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», освітньо-проф. прогр. «Комп’ютерно- інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / С. П. Вислоух, О. В. Волошко, Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 115.44 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 267 с. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53876

22. Квєтний, Р. Н., etal. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина І. 2013.– 193 с.https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19557/7.2.1%20%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%27%D1%8E%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD

%D0%B5%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%20%D1%82%D0%B0%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%96%D0%B2.output.pdf?sequence=1&isAllowed=y

23. Кваско, Михайло Зіновійович. Числові методи комп'ютерного моделювання автоматичних систем. Алгоритми і програми : Навч. посібник для студ. внз за напр. "Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології" / М.З. Кваско, А.І. Кубрак, А.І. Жученко ; НТУУ "КПІ". – Київ : Політехніка, 2003. – 360 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000151034&local_base=KPI01

24. Комп'ютерне моделювання інформаційно-аналітичних систем / О.Г. Додонов [та ін.] ; Національна академія наук України, Інститут проблем рєєстрації інформації. – Київ : ІПРІ НАН України, 2017. – 238 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000582965&local_base=KPI01

25. Кузяєв, Іван Михайлович. Основи комп'ютерного моделювання технічних систем : навчальний посібник / І.М. Кузяєв, Ситар В.І. ; Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет". – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2020.– 392 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000638965&local_base=KPI01

26. Кучма, Марія Іванівна. Математичне програмування: приклади і задачі : навчальний посібник / М.І. Кучма. – Львів :Новийсвіт - 2000, 2023. – 342 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000642644&local_base=KPI01

27. Лавров, Євген Анатолійович. Математичні методи дослідження операцій :підручник /Є.А. Лавров, Л.П. Перхун, В.В. Шендрик, Е.Г. Кузнєцов, Ю.В. Парфененко В.А. Сергієнко ; Міністерство освіти і науки України,

Сумський державний університет. – Суми: Сумський державний університет, 2017. – 211 с.
https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000602179&local_base=KPI01

28. Ладогубець, Т. С. Математичне моделювання: комп'ютерний практикум з дисципліни «Математичне моделювання» [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 113 «Прикладна математика», спеціалізації «Наука про дані та математичне моделювання» / Т. С. Ладогубець, О. Д. Фіногенов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 59 с.https://ela.kpi.ua/handle/123456789/43388

29.Математичніметоди в задачах автоматизації [Електронний ресурс] : навчальнийпосібник для студентівспеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегрованітехнології» / КПІ ім. ІгоряСікорського ; уклад.: А. І. Жученко, Л. Д. Ярощук, Т. А. Дунаєва.– Київ : КПІ ім. ІгоряСікорського, 2021. – 385 с.https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42261

30. Моделювання систем [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачівступеню бакалавра за освітньоюпрограмою «Комп'ютернітехнології в біології та медицині» спеціальності «Комп'ютерні науки» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: К. Х. Зеленський, Є. А. Настенко, В. А. Павлов. –. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 295 с.https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53803

31. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. / Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. – Київ: НАУ, 2017. – 392 с. Режим доступу: https://cutt.ly/xZtVmwx

32. Нефьодов, Юрій Михайлович. Методи оптимізації в прикладах і задачах :навчальний посібник для вищих навчальних закладів/Ю.М. Нефьодов, Т.Ю. Балицька ; Міністерство освіти і науки України ; Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля.–Київ :Кондор,2025.–323с. https://discovery.kpi.ua/Record/000647681

33. Обод, Іван Іванович. Математичне моделювання інформаційних систем :навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за галузями знань 12 "Інформаційні технології", 15 "Автоматизація

та приладобудування", 17 "Електроніка та телекомунікації" /І.І. Обод, І.В. Свид, І.В. Рубан, Г.Е. Заволодько; Міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків :Друкарня Мадрид,2019.– 269 с. https://discovery.kpi.ua/Record/000611066

34. Обод, Іван Іванович. Математичне моделювання систем : навчальний посібник для студентів спеціальностей "Комп'ютерна інженерія", "Комп'ютерні науки та інформаційні технології" / І.І. Обод, Г.Е. Заволодько, І.В. Свид ; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут".–Харків : Друкарня Мадрид, 2019. – 267 с.https://discovery.kpi.ua/Record/000608529

35. Павленко П.М. Основи математичного моделювання систем і процесів: навч. посіб. – Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2014. − 274 с.Режим доступу: https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/37026/1/%d0%9d%d0%b0%d0%b2%d1%87.%d0%bf%d0%be%d1%81%d1%96%d0%b1%d0%bd.pdf

36. Пістунов І.М. Чисельні методи: Навч. посібник. [Електронне видання] / І.М. Пістунов ; Нац. гірн. ун–т. – Дніпропетровськ : НГУ 2014. – 215 с.Режим доступу: http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/161040/IIiCTYHOB_4M.pdf?sequence=1

37. Петренко, Анатолій Іванович. Моделювання складних систем :конспект лекцій /А.І. Петренко ; Міністерство освіти і науки України, НТУУ "КПІ", Інститут прикладного системного аналізу.–Київ :НТУУ "КПІ",2013.–216 с. https://discovery.kpi.ua/Record/000370445

38. .Павленко П.М. Основи математичного моделювання систем і процесів: навч. посіб. – Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2014. − 274 с. Режим доступу: https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/37026/1/%d0%9d%d0%b0%d0%b2%d1%87.%d0%bf%d0%be%d1%81%d1%96%d0%b1%d0%bd.pdf

39. Поповський, Олексій Юрійович. Чисельні методи в комп'ютерних технологіях : навчальний посібник / О.Ю. Поповський, А.В. Камєнєва ; Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Одеська національна морська академія. – Одеса : [Одеська національна морська академія], 2012. – 167, [1] с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000295388&local_base=KPI01

40. Півторак, Д. О. Комп’ютерне моделювання процесів і систем. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Д. О. Півторак, Ю. Ф. Лазарєв, С. Л. Лакоза ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 207 с.

https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38916

41. Радченко, Станіслав Григорович. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем : навчально-метод. пос. для студ. техн. спец. вузів / С.Г. Радченко. – Київ : Політехніка, 2001. – 88 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000123846&local_base=KPI01

42. Тимощук, Павло Володимирович. Принципи штучних нейронних мереж та їх застосування :навчальний посібник /Павло Тимощук, Михайло Лобур ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". Principles of Artificial Neural Networks and Their Applications –Львів :Видавництво Львівська політехніка,2020.–291 с.https://discovery.kpi.ua/Record/000638675

43. Ткаченко, Роман Олексійович. Нейромережеві засоби штучного інтелекту : навчальний посібник / Р.О. Ткаченко, П.Р. Ткаченко, І.В. Ізонін ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. – 206 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000616936&local_base=KPI01

44. Томашевський, Валентин Миколайович. Вирішення практичних завдань методами комп'ютерного моделювання : Навчальний посібник / В.М. Томашевський, О.Г. Жданова, О.О. Жолдаков. – К. : Корнійчук, 2001. – 268 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000132700&local_base=KPI01

45. Томашевський, Валентин Миколайович. Моделювання систем : підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямами "Комп'ютерні науки", "Комп'ютеризовані системи, автоматика і управління", "Комп'ютерна інженерія", "Прикладна математика" / В. М. Томашевський.– Київ : BHV, 2007. – 352 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000596292&local_base=KPI01

46.Черепанська, Ірина Юріївна. Штучні нейронні мережі при вирішенні задач технологічної підготовки гнучкого виробництва : монографія / І.Ю. Черепанська, О.М. Безвесільна, А.Ю. Сазонов ; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 193 с.https://discovery.kpi.ua/Record/000600899

47. Чуйко Г. П. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. / Г. П. Чуйко, О. В. Дворник, О. М. Яремчук. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2015. – 244 с. Режим доступу: https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/handle/123456789/105

48. Хіміч, Олександр Миколайович. Методи математичного моделювання та ідентифікації складних процесів і систем на основі високопродуктивних обчислень : (нейро- та нанопористі кіберфізичні системи із зворотніми зв'язками, моделі з даними розрідженої структури, паралельні обчислення) : монографія / О.М. Хіміч, М.Р. Петрик, Д.М. Михалик, І.В. Бойко, О.В. Попов, В.А. Сидорук ; Національна академія наук України, Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова. – Київ : Видавництво Національної академії наук України, 2019. – 175 с.

https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000629720&local_base=KPI01

49.Alessandro Bombelli, Bilge Atasoy Stefano, Fazi Doris Boschmav. From the ORytoapplication: learning to optimize with Operations Researchinaninteractiveway. – 2024. – 313 p.

https://textbooks.open.tudelft.nl/textbooks/catalog/view/94/212/471

50. Artificial Intelligence for Autonomous Networks / ed. by Mazin Gilbert. Boca Raton; London; New York : CRC Press : Chapman & Hall, 2020. 392 p. URL: https://discovery.kpi.ua/Record/000616063

51. Borg I., Lingoes J. Multidimensional Similarity Structure Analysis. New York : Springer Science & Business Media, 2012. 374 p. URL: https://books.google.com/books?id=1FrlBwAAQBAJ

52. Carter M., Price C. C., Rabadi G. Operations Research: A Practical Introduction. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC, 2018. 722 p. URL: https://operationsresearch.us/dashboard/uploads/files/39bgdvhzr4s6yl0.pdf

53. Gould R. Graph Theory. Mineola, NY : Dover Publications (Courier Corporation), 2013. 160 p.

URL: https://books.google.com/books?id=Va8AAQAAQBAJ

54. Ladyman J., Lambert J., Wiesner K. What Is a Complex System? // European Journal for Philosophy of Science. 2013. Vol. 3, No. 1. P. 33–67. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s13194-012-0056-8

55. Seltman H. J. Experimental Design and Analysis. Pittsburgh : Carnegie Mellon University, 2012. 428 p.

URL:https://www.pmtutor.org/resources/course_resources/Designed_Experiment.pdf (дата звернення: 18.06.2026).

56. Siegenfeld A. F., Bar-Yam Y. An Introduction to Complex Systems Science and Its Applications // Complexity. 2020. Vol. 2020. Article ID 6105872. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1155/2020/6105872

57. Zgurovsky M., Sineglazov V., Chumachenko E. Artificial Intelligence Systems Based on Hybrid Neural Networks: Theory and Applications. Cham : Springer Nature, 2020. 512 p. URL: https://discovery.kpi.ua/Record/000617436

58. Zhang W. J. Self-Organizology: The Science of Self-Organization. Singapore : World Scientific Publishing, 2015. 387 p.

URL: https://books.google.com/books?id=IczACwAAQBAJ