

С.П. Вислоух

**Інформаційні технології
в задачах технологічної
підготовки приладо- та
машинобудівного
виробництва**

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут”

С.П. Вислоух

**Інформаційні технології
в задачах технологічної підготовки
приладо- та машинобудівного
виробництва**

Монографія

Київ
НТУУ „КПІ”
2011

УДК 681.2.002:658.512.4:004

ББК 34.5-5-05

В53

*Рекомендовано до друку Вченою радою НТУУ „КПІ”
(Протокол № 5 від 11.05.2011 р.)*

Рецензенти: *В.М. Шарапов*, д-р техн. наук,
Черкаський державний технологічний університет

В.А. Пасічник, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Б.В. Лупкін, д-р техн. наук, проф.,
Навчально-консультаційний пункт з дистанційної освіти
Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Відповідальний редактор *Г.С. Тимчик*, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Вислоух С.П.

В53 Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 488 с. – Бібліогр. в кінці розділів. – 300 пр.

ISBN 978-966-622-445-6

Наведено результати наукових досліджень, що полягають в підвищенні ефективності технологічної підготовки виробництва на основі використання сучасних інформаційних технологій, можливостей методів багатовимірного статистичного аналізу, математичного та імітаційного 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 дослідження оброблюваності матеріалів різанням, моделювання й оптимізації роботи виробничих технологічних систем та автоматизованого проектування технологічних процесів.

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

УДК 681.2.002:658.512.4:004

ББК 34.5-5-05

ISBN -966-622-445-6

© С.П. Вислоух, 2011

© НТУУ «КПІ» (ФАКС), 2011

ЗМІСТ

Стор.

Вступ	8
Розділ 1 Сучасний стан інформаційних технологій при розв'язанні технологічних задач в приладо- та машинобудуванні	10
1.1. Сучасні погляди на інформаційну технологію і її вплив на життєвий цикл виробів	10
1.2. Технологія як об'єкт проектування	12
1.3. Вимоги сучасного виробництва до автоматизації технологічного проектування	17
1.4. Технологічний зміст функціональних залежностей автоматизованого проектування	18
1.5. Математичне моделювання об'єктів технологічних систем	21
1.6. Математичне моделювання технології складання виробів	29
1.7. Оптимізація технологічних параметрів	32
Висновки до розділу та задачі досліджень	35
Перелік посилань до розділу 1	39
Розділ 2 Підвищення інформативності початкової інформації при розв'язанні технологічних задач	52
2.1. Зниження розмірності інформаційних масивів методами факторного аналізу	52
2.2. Зниження розмірності інформаційних масивів методом компонентного аналізу	59
2.3. Багатовимірне шкалювання	69
Висновки до розділу	84
Перелік посилань до розділу 2	87
Розділ 3 Класифікація та розпізнавання образів в задачах технологічної підготовки виробництва	90
3.1. Кластерний аналіз технологічної інформації	91
3.2. Дискримінантний аналіз технологічної інформації	102
3.3. Використання методів дискримінантного аналізу для дослідження технологічних характеристик конструкційних матеріалів	107
3.4. Класифікація шляхом зниження розмірності	117
3.5. Використання методів багатовимірного статистичного аналізу для визначення оброблюваності конструкційних матеріалів	121
3.5.1. Методика визначення оброблюваності конструкційних матеріалів методами багатовимірного статистичного аналізу	123
3.5.2. Визначення реальної оброблюваності конструкційного матеріалу	126
3.5.3. Визначення відносної оброблюваності конструкційних матеріалів	133
3.6. Автоматизована система обробки технологічної інформації методами багатовимірного статистичного аналізу	139

Висновки до розділу	140
Перелік посилань до розділу 3	144
Розділ 4 Математичне моделювання параметрів технологічних систем	148
4.1. Основи побудови математичних моделей	148
4.2. Декомпозиція технологічних об'єктів	149
4.3. Чисельні методи моделювання	151
4.3.1. Інтерполяція функцій	151
4.3.2. Апроксимація функцій методом найменших квадратів	155
4.4. Експериментально-статистичні методи побудови математичних моделей	158
4.4.1. Планування експериментів	158
4.4.2. Регресійний аналіз	161
4.5. Моделювання параметрів з використанням методів теорії подібності та аналізу розмірностей	164
4.6. Фрактальний аналіз технологічної інформації	173
4.7. Індуктивні методи самоорганізації моделей	183
4.7.1 Синтез математичних моделей за допомогою методів групового врахування аргументів	183
4.7.2. Нечіткий метод групового врахування аргументів	191
4.7.3. Використання нечіткого методу групового врахування аргументів для моделювання та прогнозування технологічних параметрів	194
4.8. Моделювання технологічних параметрів шляхом використання штучних нейронних мереж	203
4.8.1. Нейронні мережі як спосіб дослідження інформації	203
4.8.2. Побудова та використання штучних нейронних мереж пакету MatLab для розв'язання технологічних задач	207
4.8.3. Побудова та використання штучних нейронних мереж системи NeuroSolutions для розв'язання технологічних задач	216
Висновки до розділу	219
Перелік посилань до розділу 4	222
Розділ 5 Оптимізація технологічних параметрів	230
5.1. Рекомендації з використання методів параметричної оптимізації	230
5.2. Метод опуклого нелінійного математичного програмування	239
5.3. Метод ковзаючого допуску	241
5.4. Метод направленої випадкової пошуку з самонавчанням	244
5.5. Метод стохастичного математичного програмування	248
5.6. Багатокритеріальна оптимізація технологічних параметрів	253
Висновки до розділу	260
Перелік посилань до розділу 5	261
Розділ 6 Моделювання та оптимізація роботи виробничих технологічних систем	265
6.1. Основи структурної та параметричної оптимізації виробничих систем	265
6.2. Вибір методу моделювання виробничих систем	271

6.3. Дискретна оптимізація технологічних систем	272
6.4. Структурно-логічний метод моделювання та оптимізації роботи виробничих систем	274
6.4.1. Побудова математичних моделей виробничих систем	274
6.4.2. Система математичного моделювання та оптимізації завантаження технологічного обладнання	279
6.5. Моделювання роботи виробничих систем за допомогою мереж Петрі	283
6.5.1. Мережі Петрі як засіб моделювання роботи виробничих систем	285
6.5.1.1 Мережі Петрі та особливості їх використання для опису складних систем	285
6.5.1.2. Задачі моделювання виробничих систем за допомогою мереж Петрі	286
6.5.2. Автоматизована система моделювання завантаження технологічного обладнання	292
Висновки до розділу	303
Перелік посилань до розділу 6	304
Розділ 7 Автоматизоване визначення оброблюваності конструкційних матеріалів різанням	308
7.1. Вибір методу і розробка алгоритму одержання математичних моделей	309
7.2. Методика визначення оброблюваності матеріалів різанням	314
7.3. Алгоритм визначення оброблюваності матеріалів різанням	323
7.4. Автоматизована система отримання математичних моделей та визначення оброблюваності матеріалів різанням	325
7.5. Практичне використання автоматизованої системи визначення оброблюваності різанням конструкційних матеріалів	331
7.5.1. Визначення відносної оброблюваності матеріалів	331
7.5.2. Визначення реальної оброблюваності матеріалів	333
Висновки до розділу	334
Перелік посилань до розділу 7	336
Розділ 8 Автоматизоване проектування технології механічної обробки корпусних деталей	338
8.1. Розробка інформаційної моделі деталі	339
8.1.1. Аналіз інформаційних зв'язків у системах технологічного проектування	339
8.1.2. Формалізація опису оброблюваної деталі	343
8.2. Розробка структурної схеми інформаційної моделі деталі	346
8.3. Розробка методу дослідження інформаційної моделі деталі	349
8.4. Математичне забезпечення автоматизованої системи проектування технології виготовлення корпусних деталей	350
8.5. Програмне забезпечення автоматизованої системи	355
8.6. Методика автоматизованого проектування маршрутної технології	

виготовлення корпусних деталей	355
8.7. Автоматизоване проектування операційної технології обробки	
типових поверхонь деталей	357
Висновки до розділу	364
Перелік посилань до розділу 8	365
Розділ 9 Автоматизація проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні	368
9.1. Технологічні основи автоматизації проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні	368
9.1.1. Задачі, розв'язувані при автоматизації проектування технології механоскладальних робіт	368
9.1.2. Формалізація процесу проектування технології складання виробів приладобудування	370
9.2. Технологічні особливості складання виробів приладобудування	373
9.2.1. Класифікація та групування виробів приладобудування	374
9.2.2. Створення інформаційної моделі виробу	375
9.3. Моделювання технології складання приладів	377
9.3.1. Інформаційні зв'язки в технологічних процесах складання виробів приладобудування	377
9.3.2. Інформаційна модель технологічного процесу складання	378
9.3.3. Алгоритм технологічного поділу складальної одиниці на складові елементи	383
9.3.4. Формування порядку складання виробу	384
9.4. Автоматизована система проектування технології складання виробів приладобудування	386
9.4.1. Структурна схема системи	388
9.4.2. Функціональна схема системи проектування	388
9.4.3. Інформаційне забезпечення системи	391
9.4.4. Математичне забезпечення системи	395
9.4.5. Програмне забезпечення системи	395
9.4.6. Методичне забезпечення системи	397
9.4.7. Віртуальне складання виробу та формування вихідної технологічної документації	405
Висновки до розділу	406
Перелік посилань до розділу 9	407
Висновки	411
Додатки	413
Додаток А. Значення факторів та головних компонент, що дозволяють знизити розмірність масивів початкової інформації без зниження їх інформативності	413
Додаток Б. Значення коефіцієнтів класифікаційних функцій, що отримані методом дискримінантного аналізу	418
Додаток В. Аналіз пакетів програм, що реалізують штучні нейронні мережі	423
Додаток Д. Схеми алгоритмів, що моделюють роботу дільниці механічної	

обробки деталей	427
Додаток Е. Мережі Петрі, що моделюють роботу ділянки механічної обробки деталей по стану в різний час від початку обробки партії деталей	435
Додаток К. Інформаційні масиви автоматизованої системи проектування маршрутною технології виготовлення корпусних деталей	438
Додаток Л. Структура інформаційних масивів системи „ТехноМастер”	450
Додаток М. Інформаційне забезпечення системи „ТехноМастер”	457
Додаток Н. Робота проектувальника в системі АСПТ МСР „ТехноМастер”	468

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 розв'язання та початкової інформації для їх рішення. Тому актуальною є проблема розробки наукових підходів до обробки технологічної інформації та обґрунтованого вибору методів розв'язання 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 методик, 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 розв'язання задач технологічної підготовки виробництва.

Це обумовлює необхідність створення методик обробки технологічної інформації шляхом використання багатовимірних статистичних аналізів 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 досліджень даної наукової роботи 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 виробничих технологічних систем в приладо- та машинобудуванні.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ 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 [1.1 – 1.6].

Сучасна технологія повинна відповідати таким вимогам [1.7, 1.8]:

- 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:

- 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 [1.9] і інформаційних технологій [1.10 – 1.17].

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 метасистемою 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 [1.1, 1.2].

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 ЕОМ можна виділити такі основні етапи: формалізована постановка завдання, її алгоритмізація і визначення початкових даних; програмування; збір і підготовка початкових даних; виконання програми на ЕОМ; аналіз і інтерпретація результатів [1.10].

Між технологіями може існувати і причинно-наслідковий зв'язок типу „якщо..., то...” [1.17]. 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 рекурсивно, що є віддзеркаленням ієрархічної структури складного виробу [1.1 – 1.4, 1.10, 1.18], 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 [1.19, 1.20].

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 [1.14] :

- 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 [1.20]. Таке визначення підкреслює величезне різноманіття змісту інформації, що виявляється в найрізноманітніших фізичних, економічних і соціальних явищах.

1.2 Технологія як об'єкт проектування

Сучасне приладо- та машинобудівне виробництво є різносерійним, багатомоноклатурним з частою зміною виробів, що виготовляються [1.21]. Продукція, що випускається, характеризується підвищеною конструктивною складністю, великою кількістю оригінальних і унікальних конструктивних рішень, реалізація яких супроводжується високими вимогами до якості, надійності і ресурсу виробів. Підвищення конструктивної складності та якості виробів, швидке їх оновлення спостерігається повсюдно у всіх областях; без цього неможливо задовольнити зростаючі потреби господарства країни в продукції приладо- та машинобудування [1.21 – 1.28].

В даний час зросли вимоги до скорочення, термінів розробки технології (технологічних процесів і засобів їх оснащення) при поліпшенні її якості. Особливо актуальним це стає при широкому розвитку гнучких виробничих систем (ГВС). Ефективне використання ГВС вимагає автоматизації технологічної підготовки ГВС, зокрема проектування технології виготовлення виробів[1.29].

Проектні роботи в технологічній підготовці виробництва є найбільш трудомісткою ділянкою, вони включають аналіз конструкторських креслень, проектування технологічних процесів і засобів його оснащення, а також відлагодження технології. Технологічний аналіз конструкторських креслень проводять для визначення оптимальних шляхів отримання готової продукції і оптимізації різного роду витрат при її виготовленні [1.30 – 1.43].

Технологію проектують з метою визначення порядку використання методів і технічних засобів, що забезпечують функціонування виробничої системи. Таким чином, проектування технології направлене на створення документів, що регламентують поведінку виробничої системи та її ланок при виготовленні деталей і виробів.

Задача автоматизації технологічного проектування надзвичайно актуальна. Її рішення забезпечить різке скорочення термінів впровадження у виробництво нових проектно-конструкторських розробок, що є необхідною

умовою підвищення їх ефективності. Разом з тим рішення цієї задачі пов'язане з великими труднощами. Це обумовлено як особливостями технологічного проектування, яке традиційно вважається творчим процесом, так і зростаючими вимогами сучасного виробництва до автоматизованих систем [1.21].

Отже, системи автоматизованого проектування технології повинні діяти в умовах великої різноманітності завдань на проектування і виробничих ситуацій. Неможливо наперед передбачити і описати ці ситуації, не мали успіху і спроби їх стандартизувати. У зв'язку з цим найбільш перспективним в області автоматизації технологічного проектування є науковий напрям, що виник на стику двох наук, – технології і математичної логіки, в основу якого покладено дослідження механізму побудови технологічних понять і їх класифікація. Основні методологічні і методичні аспекти цього напрямку розкриті в [1.21].

Завдяки єдиній суворій теорії елементів описової технології і математичної логіки, авторам [1.44 – 1.57] вдалося визначити закономірності формування проектних рішень технології і представити у вигляді математичних функцій не тільки технологічні об'єкти і ситуації, але і процес проектування технології. Для опису виробничих ситуацій і взаємодій технологічних об'єктів використана логіка предикатів, а для перетворень функцій — числення висловів.

Представлення процесів проектування у вигляді процесів логічних формальних виведень дозволило створити теорію автоматизації процесів проектування у формі числення спеціального вигляду, яка містить узагальнені функції проектування, що забезпечують побудову проекту не для окремих завдань (або їх наборів), а для практично будь-якого виду завдань, будь-якої виробничої ситуації, що виникає при виготовленні виробів машинобудування. Побудована таким чином детермінована програма дозволяє задовільно імітувати дії технолога при проектуванні технологічних процесів [1.33].

Основна методологічна проблема автоматизації проектування технології – співвідношення змістовного і абстрактного. Ця проблема вирішена шляхом встановлення трьох рівнів абстракції. На першому рівні визначено домінуючий зміст явища, що вивчається, і виявлено загальні закономірності залежностей проектних рішень від початкових даних. На другому рівні розкрито кібернетичні властивості процесів проектування. На третьому рівні побудовано логічне числення, що є математичним описом процесів проектування технології виготовлення виробів приладо- та машинобудування.

Взаємозв'язок комплексу проблем автоматизації проектування технології – від проблем формалізації до основ побудови спеціального програмного забезпечення систем автоматизованого проектування технології розглянуто в [1.33, 1.40 – 1.70]. Запропонована в цих працях теорія автоматизації процесів проектування технології, що основана на формальних уявленнях, може бути використана як база для формалізації технології приладо- та машинобудування.

Автоматизація проектних робіт на виробництві забезпечує інтенсифікацію праці інженерів і техніків, економію трудових ресурсів, що дозволяє підвищити якість роботи технологічних служб і, нарешті, поліпшити технологію виготовлення продукції та її якість.

На етапах технологічної підготовки виробництва виникають завдання як творчого характеру, виконання яких вимагає високої кваліфікації і досвіду інженера, так і рутинного характеру, що вирішуються фахівцями нижчої кваліфікації.

В даний час намітився розрив між інтенсифікацією власне виробництва і темпами його технологічної підготовки [1.33, 1.40, 1.46, 1.47, 1.50, 1.51, 1.60, 1.62, 1.63, 1.74 – 1.78]. Низькі темпи підготовки виробництва стримують виробничий темп і значно знижують ефективність заходів з удосконалення виробництва. Найважливішим засобом інтенсифікації виробництва в приладо- та машинобудуванні є автоматизація проектування технології, яка повинна забезпечувати автоматизацію інженерної праці як в рутинних, так і в творчих областях. Автоматизація проектування є інструментом рішення виробничих задач на новому, вищому якісному рівні.

Без автоматизації проектування технології не може ефективно працювати ні автоматизована ділянка, ні тим більше гнучка виробнича система. Автоматизація технологічної підготовки виробництва і найважливішої його частини – проектування технології механічної обробки і складання є необхідною умовою комплексної автоматизації виробництва та його ефективного функціонування. Використання сучасної обчислювальної техніки в рішенні задач проектування стало можливе в результаті розвитку наукових основ технології і відповідних розділів математики[1.77 – 1.87].

В процесі розвитку автоматизації проектування технології створено інформаційно-пошукові і інформаційно-логічні системи проектування технології приладо- та машинобудування. Ці системи в процесі проектування здійснюють пошук або створення проектного рішення, що задовольняє ситуаціям виготовлення та заданому набору їх ознак і властивостей продукції або її елементів. Основу автоматизованого проектування в інформаційно-пошукових системах (ІПС) технології приладо- та машинобудування складає процес знаходження з наперед записаних в пам'яті комп'ютера такого проектного рішення, ознаки і властивості якого співпадають із закладеними в початкових даних. Основу автоматизованого рішення задач проектування технології в інформаційно-логічних системах (ІЛС) складають аналітичні і логічні залежності, що пов'язують параметри оброблюваної заготовки із структурою і характеристиками технологічного процесу та оснащення для її виготовлення; а також розв'язують питання технології складання.

ІПС фіксує певний досягнутий стан і не передбачає проектування технології для абсолютно нових виробів, оскільки в ній не враховуються зміни умов їх виконання. Таким чином, ІПС не є універсальними, вони не можуть забезпечити виконання всіх вимог сучасного виробництва.

Більш широкі можливості мають ІЛС проектування технології [1.40, 1.41]. Одними з представників цього напрямку є багаторівневі ітераційні системи проектування технологічних процесів механічної обробки, проектування процесів складання, розробки конструкцій оснащення [1.41]. Системи цього типу відображають досвід рішення складних конструкторсько-технологічних задач, коли у зв'язку з недостатністю апріорної інформації

рішення першого рівня носять найбільш загальний характер і на подальших рівнях розгортаються до необхідного ступеня деталізації. Види і кількість рівнів залежать від складності проєктованих об'єктів або процесів, а також від необхідного ступеня деталізації інформаційних моделей проєктів [1.40, 1.41].

В той же час треба відзначити, що:

а) в технології приладо- та машинобудування ще не виявлені (повною мірою) аналітичні і логічні залежності, що зв'язують характеристики оброблюваної заготовки, устаткування та оснащення із структурою і параметрами технологічного процесу;

б) при розробці технології необхідно враховувати зміни номенклатури деталей, що випускаються, заміну застарілого устаткування новим, безперервне поновлення технологічного оснащення і інструменту, впровадження прогресивної технології, поновлення використовуваних основних матеріалів і технологічних норм;

в) до початку проєктування технології немає повного набору початкових даних і обмежень для отримання проєктних рішень з необхідним ступенем деталізації;

г) методи рішення, що створені при розробці багаторівневих ітераційних систем в технології приладо- та машинобудування (БІС Т), є найбільш загальними в подоланні початкової невизначеності задач технологічного проєктування.

Основу проєктування при розробці БІС Т складають початкові посилення і принципи, що відображають не прості істини, доказ яких не потрібний, а фундаментальні технологічні закономірності. На основі початкових посилень зверху вниз розгортається ціла система конкретніших тверджень і наслідків, що є базою для побудови алгоритмів і програм технологічного проєктування. Побудована система тверджень має ієрархічну будову. На кожному рівні проєктні рішення є різними, вони деталізуються від рівня до рівня. Деталізація визначається попередніми проєктними рішеннями. Початкові дані подальшого рівня залежать від проєктного рішення попереднього рівня. Дані функції рішення дозволяють при завданні початкового проєктного рішення і початкових даних знайти подальше проєктне рішення за умови, що визначена (описана) ситуація на кожному рівні. Враховуючи, що визначення проєктного рішення на кожному рівні ведеться за етапами (кроками), для функціонування багаторівневої ітераційної системи проєктування необхідний опис ситуацій не тільки на кожному рівні, але і на кожному кроці рівня.

Не зважаючи на значні переваги БІС Т перед ІПС, системи цього роду мають деякі недоліки. Для забезпечення функціонування БІС Т потрібне попереднє рішення задачі визначення ситуацій, їх опис і побудову схеми зв'язків ситуацій і проєктних рішень як по рівнях, так і всередині рівня. Оскільки структури описів ситуацій позбавлені загальних законів їх побудови, то ці схеми представляють таблицями, що складені на основі досвіду і записані в пам'яті комп'ютера.

Головний недолік цих систем – нетиражованість. Алгоритмічні і програмні рівні потребують налаштування при переході від одного

підприємства до іншого [1.40, 1.41].

Переналаштування алгоритмів і програм свідчить про те, що частина відомостей про відносини, ситуації, проектні рішення і початкові дані записується як початкова інформація в пам'ять комп'ютера, а не створюються в процесі проектування.

Загалом, автоматизація проектування на основі багаторівневого ітераційного методу не дозволяє виконати одночасно вимоги сучасного виробництва до САПР ТП: універсальності, багатофункціональності і комплексності. Оскільки закономірності процесу автоматизованого проектування не розкриті в повному об'ємі, то при використанні БІС Т ступінь автоматизації, що досягається, залежить від складності деталі або в загальному випадку від завдання на проектування. Таким чином, загального закону рішення задач в БІС Т не закладено, і вона може вирішувати лише окремі безумовно складні технологічні завдання.

Різноманітність конструкцій, що визначають початкові дані на проектування ситуацій, які дозволяють охарактеризувати виробництво, його можливості і технологічні правила виготовлення, така велика, що частковий їх запис в пам'ять комп'ютера не приводить до принципово нових можливостей отримання результату. САПР ТП, що побудовані за принципами ІПС або БІС, не мають властивостей відносно універсальності до завдання на проектування, багатофункціональності у використанні і комплексності при функціонуванні в умовах виробництва.

Існуючі САПР не вирішують проблеми автоматизації проектування і не можуть бути використані для проектування технології виготовлення конструкцій, які раніше на практиці не застосовувалися. Це положення значною мірою пов'язане з відсутністю методології і теорії автоматизації проектування і прикладної теорії автоматизації проектування технології.

Для створення автоматизованих систем проектування, що задовольняють вимогам сучасного виробництва (універсальність, багатофункціональність і комплексність), перш за все повинні бути створені спеціальна методологія і теорія, що розкривають процеси проектування, які представляються в математичному і, зрештою, в програмному вигляді. Методологія і теорія повинні бути загальними в тому сенсі, що побудована з їх допомогою методика проектування повинна враховувати будь-які виробничі структури, різні економічні вимоги і в той же час спиратися на закони виготовлення деталей і виробів приладо- та машинобудування; повинні описувати складний взаємозв'язок чинників виготовлення з чинниками виробництва, управління і економіки.

Таким чином, необхідне створення прикладної теорії автоматизації проектування, що об'єднує різні за характером і змістом завдання технології приладо- та машинобудування, а також теорії синтезу автоматизованих систем проектування.

Особливістю сучасної технології приладо- та машинобудування, в якій формальна сторона розроблена недостатньо, при рішенні задач проектування досвід технолога і його інтуїція мають першочергове значення. Основного

значення тут набувають питання процесу рішення задач проектування технології і послідовності їх рішення. Закономірності рішення задач проектування є фундаментальною основою синтезу багатofункціональних систем і визначають методи використання засобів обчислювальної техніки, програмних засобів загального призначення, різних операційних систем, методів програмування функціональних завдань проектування.

1.3 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.

При розробці систем автоматизації проектування технології приладо- та машинобудування повинні бути враховані наступні умови їх функціонування [1.33, 1.40, 1.42, 1.45, 1.50, 1.56 – 1.58, 1.60, 1.63, 1.65, 1.66, 1.70]:

- 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, відлагодження 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

1.4 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 ґрунтуються 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.

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 багатofункціональних 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 проектного 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 проектного об'єкту. Задача проектування розглядається в основі як задача якісного характеру, для якого значну, якщо не головну, роль відіграє питання вивчення взаємодії елементів проектного об'єкту між собою і визначення взаємодії проектного об'єкту із зовнішнім середовищем. Визначення параметрів є задачею визначення властивостей проектного 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, вона розглядається в багатьох працях [1.33, 1.40, 1.42, 1.45, 1.50, 1.56 – 1.58, 1.60, 1.63, 1.65, 1.66, 1.70]. 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 [1.88 – 1.91]. 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 [1.62, 1.64].

Прикладна теорія автоматизації проектування технології приладо- та машинобудування є основою теорії синтезу багатофункціональних систем проектування. Вона має логічну організацію, що ґрунтується 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 [1.62].

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 [1.34 – 1.37, 1.49 – 1.52].

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, оснований 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.

1.5 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 [1.92 – 1.115].

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 співпадання 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 [1.93].

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:

$$V = T_i \wedge m \wedge c_v \wedge k_v [(t \wedge x_v) \vee (s \wedge y_v) \vee (d \wedge z_v) \vee (B \wedge r_v)] \quad (1.2)$$

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 [1.93].

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 проектного об'єкту, наприклад, маршрутна технологія. Макро- математичні моделі відображають значно меншу кількість міжелементних 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 [1.33, 1.40, 1.43, 1.44, 1.49, 1.55, 1.56, 1.66, 1.67, 1.70, 1.75, 1.78].

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 трудомісткою 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 реалізуються командами. Всі вказані перетворення результатною ММ в послідовність елементарних дій комп'ютер виконує автоматично за спеціальними програмами.

Структурні або структурно-логічні моделі згідно ГОСТ 14.416–83 поділяють на табличні, мережеві і перестановочні, які визначаються рядками булевої матриці [1.42, 1.71, 1.93].

У табличній моделі кожному набору властивостей відповідає єдиний варіант проєктованого об'єкту, тому табличні моделі використовують для пошуку стандартних, типових або готових проєктних рішень. Моделі решти класів застосовують для отримання типових, уніфікованих і індивідуальних проєктних 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 проєктованого об'єкту, проте у всіх варіантах зберігається незмінним співвідношення порядку між вхідними елементами.

Співвідношення порядку між елементами проєктованого об'єкту в перестановочних моделях зазвичай задається графом, що містить орієнтовані цикли, причому всі варіанти об'єктів, що проєктуються за перестановочними моделями, розрізняються порядком між елементами, що в них входять. Тут об'єктом проєктування може бути технологічний процес, операція або технологічний перехід. Якщо розглядати технологічний процес як об'єкт проєктування, то операції тут будуть елементами; при проєктуванні 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 [1.93].

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 [1.93].

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 сьогодні [1.30, 1.44, 1.93, 1.116 – 1.120].

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 [1.116, 1.117, 1.125, 1.126].

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 [1.121 – 1.126].

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) [1.125, 1.126].

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 магазину 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 [1.127 – 1.138].

Моделювання роботи складних систем та оптимізація їх параметрів може здійснюватись також засобами структурно-логічного методу, основи якого наведено в [1.139, 1.140].

Для структурного моделювання та оптимізації в роботах Б.Є. Челіщева, Н.М. Капустіна, В.Д. Цветкова, В.В. Павлова та інших вчених використано методи математичного програмування й теорії графів [1.21, 1.31, 1.33, 1.34, 1.37, 1.38, 1.94, 1.96, 1.98].

Різновиди методів моделювання складних систем, до яких належать і технологічні системи, наведено на рис. 1.3.

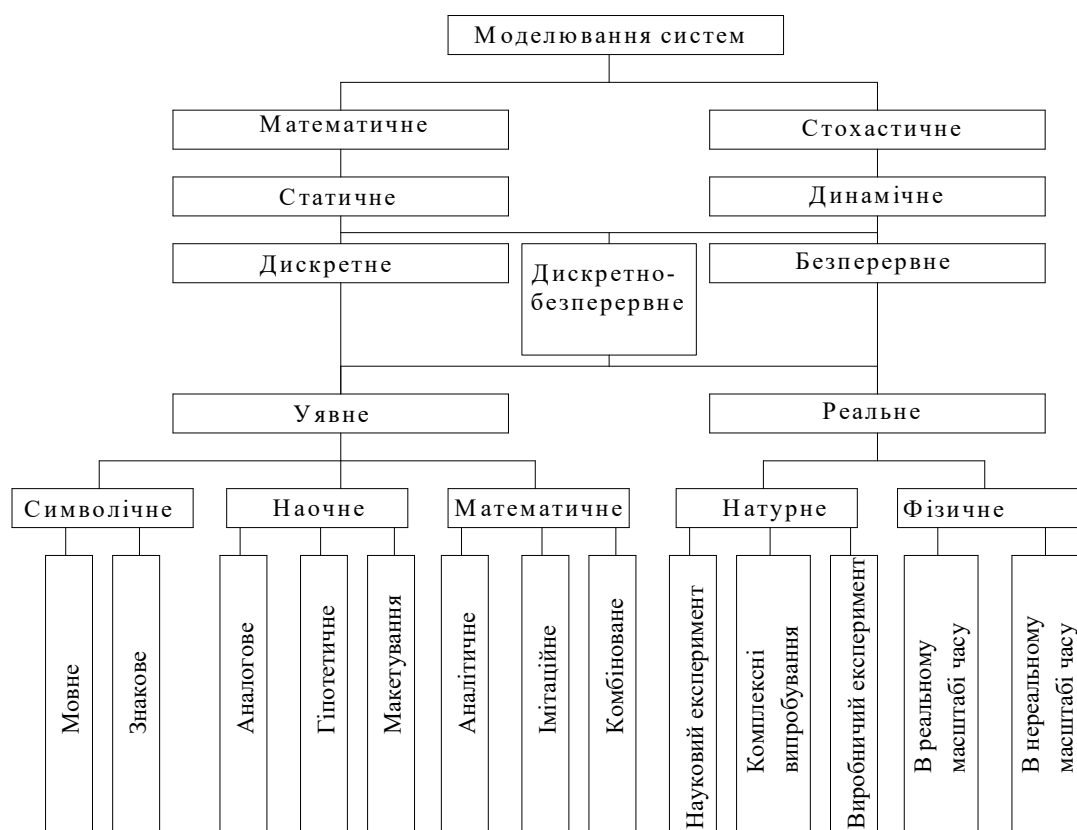


Рис. 1.3. Класифікація видів моделювання складних систем.

Методи математичного моделювання для розв'язання задач математичного моделювання з подальшою параметричною оптимізацією застосовуються в роботах Ю.М. Соломенцева, Н.М. Капустіна, В.Д. Цветкова, С.П. Мітрофанова, В.О. Остаф'єва, А.М. Гільмана, А.П. Гавриша, С.С. Сіліна, М.М. Тверського, В.В. Душинського тощо [1.29, 1.30, 1.41, 1.44, 1.46, 1.51, 1.52, 1.55, 1.56, 1.79, 1.117, 1.141 та інш.].

В роботах Д.В. Чарнко, Г.К. Горанського, В.Д. Цветкова, В.В. Павлова, А.М. Гільмана для моделювання технологічних параметрів використовуються методи терії предикатів, алгебри логіки та теорії множин [1.21, 1.33, 1.38, 1.39, 1.65, 1.78].

На рис. 1.4 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.

1.6 Математичне моделювання технології складання виробів

Виконати опис послідовності дій, що пов'язані з утворенням виробу в процесі складання, через систему формул, які розкривають формальні

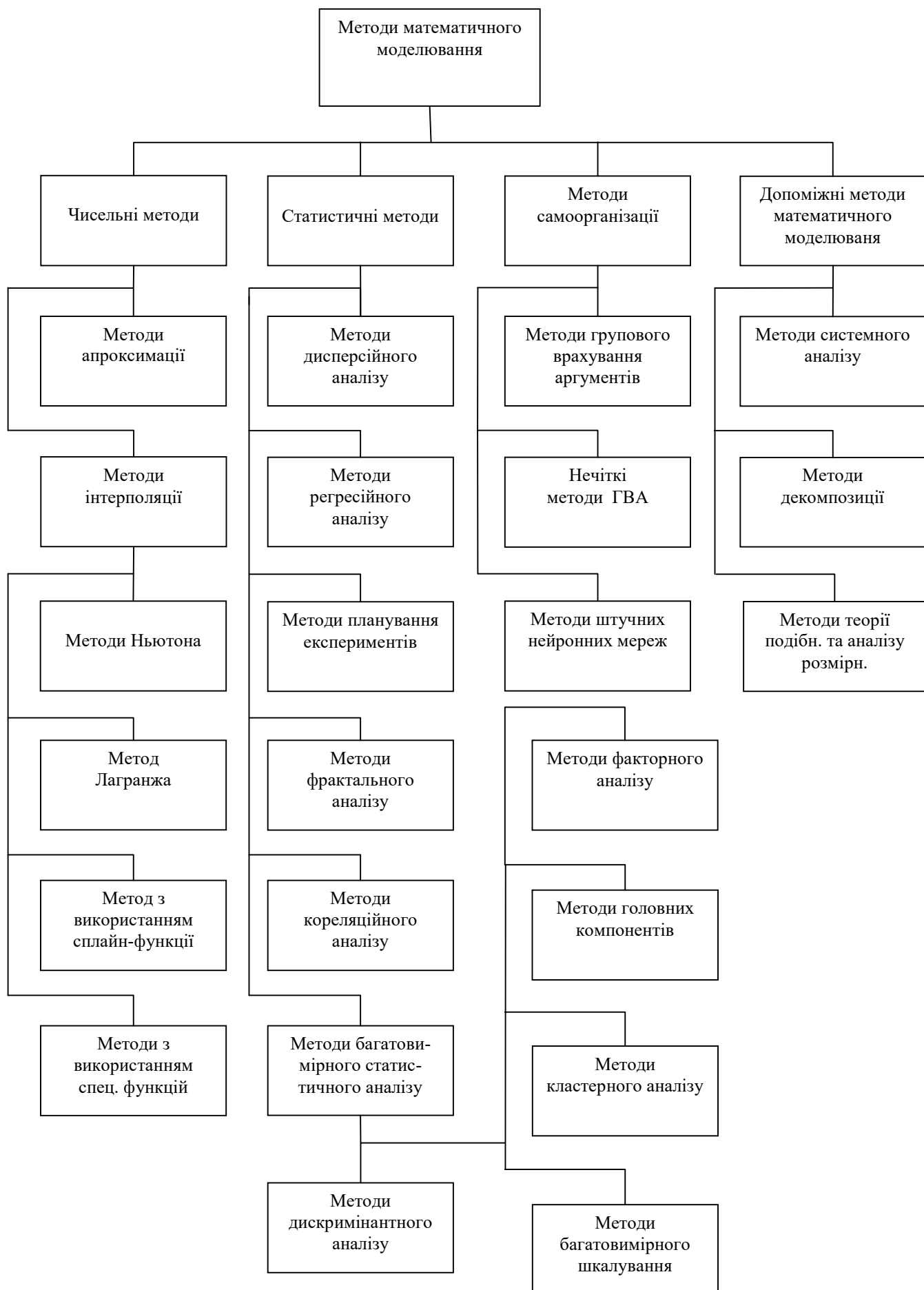


Рис. 1.4. Класифікація методів параметричного моделювання.

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. [1.47, 1.51].

Функції, що характеризують функціональні зв'язки між елементами виробу, достатньо повно розкриті в роботі [1.60], де вони задані у вигляді матриць, що встановлюють відповідність між властивостями елементів виробу і елементами виробничої системи. Аналогічно вирішено це питання і в роботах [1.40, 1.47, 1.56] стосовно технології механічної обробки.

Зазвичай [1.60] 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 Ю.М. Соломенцева [1.55, 1.70, 1.79, 1.81], І.М. Колесова, Н.М. Капустіна [1.25, 1.29, 1.40, 1.51], Б.Є.Челіщева [1.21, 1.33] та інших вчених дозволили практично реалізувати метод автоматизації проектування технологічних процесів механоскладальних робіт.

У роботах Н.Г. Бруєвича, А.П. Гавриша, Н.М. Капустіна, А.А. Маталіна, В.Г. Мітрофанова [1.32], Ю.М. Соломенцева, В.Д.Цветкова [1.31, 1.39], Б.Є. Челіщева, В.В. Павлова 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, Р.Р. Сімути тощо [1.142 – 1.153]. 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.

1.7 Оптимізація технологічних параметрів

В даний час для розв'язання задач параметричної оптимізації застосовують [1.154 – 1.217],:

а) аналітичні методи (в роботах Г.Ю. Якобса, Б.К. Ламберта, К. Тармана, У. Корена, Є. Ленца та ін.);

б) чисельні методи регулярного пошуку (І.В. Хенсель, С. Зіетарські, І. Хем, Фаріа-Гонсалес та ін.);

в) методи математичного програмування (К. Івата, А.М. Гільман, С.М. Ву, А.М. Коритін та Н.К. Шапаров, К. Хітомі, Г. Вебер, Р. Шустер, Г.К. Горанський, М.М. Капустін тощо) та інші методи.

При аналітичному розв'язанні задач оптимізації застосовуються класичні методи математичного аналізу і варіаційного числення для дослідження функції або функціонала на екстремум.

Вимоги адекватного віддзеркалення технологічного процесу в його математичній моделі призводить до того, що вона (модель) приймає складний вигляд. Тому розв'язання задачі вибору оптимальних параметрів можливо тільки за допомогою сучасних математичних методів засобами обчислювальної техніки.

Найбільш простим методом параметричної оптимізації є метод сканування (метод обходу вузлів просторової сітки). Для знаходження оптимальних режимів різання Р.З. Діланян застосовує метод регулярного

пошуку.

Найбільш часто завдання визначення оптимальних параметрів технологічного процесу обробки деталей на металорізальних верстатах представляється у вигляді завдання математичного програмування і вирішується відповідними методами. Вперше методи математичного програмування для вирішення завдання оптимізації режимів різання застосовано Г.К. Горанським. При цьому використано метод лінійного програмування – симплекс-метод (метод Данціґа-Вульфа).

Проте представити математичну модель, що використовуються при параметричній оптимізації, у вигляді лінійних залежностей зазвичай не представляється можливим. Тому для розв’язання цієї задачі використовуються методи нелінійного програмування – методи багатовимірної оптимізації без обмежень (безумовна оптимізація) та методи умовної оптимізації (за наявності обмежень).

Методи безумовної оптимізації дозволяють, відправляючись від деякого початкового рішення, отримувати послідовно значення, які знаходяться все ближче до шуканої точки мінімуму або максимуму цільової функції. Серед цих методів слід зазначити градієнтний метод, вживаний досить часто. Проте він (градієнтний метод), якщо його не модифікувати, не забезпечує швидкої збіжності після перших ітерацій, а також має іншу неприємну особливість – зигзагоподібність руху. Існує декілька чисельних методів, які дозволяють модифікувати градієнтний метод, щоб уникнути подібних зигзагів і прискорити збіжність. Одним з таких методів, який застосовується в роботі [1.178] як внутрішня процедура при умовній оптимізації, є метод Ньютона-Рафсона. Цей метод використовує напрям руху до оптимального значення, встановлений з квадратичної апроксимації цільової функції.

Зазвичай при оптимізації технологічних параметрів вирішуються задачі на умовний екстремум. В цьому випадку застосовують наступні методи: метод Гаусса-Зейделя; метод невизначених множників Лагранжа; метод відсікаючих гіперплощин; методи геометричного програмування; методи випадкового пошуку, методи стохастичного програмування та інші.

Часто для визначення оптимальних режимів обробки застосовують метод нелінійного програмування – метод Гаусса-Зейделя, що полягає в пошуку екстремуму по чергово за варійованими змінними (швидкості різання і подачі). Цей метод простий, універсальний, але характеризується багатокроковістю і, як правило, великими витратами машинного часу. Крім того, він не придатний для вирішення багатовимірних (більше трьох змінних) задач оптимізації.

Найбільш поширеним методом рішення задач оптимізації режимів різання є метод невизначених множників Лагранжа. При застосуванні цього методу початкове завдання з обмеженнями типу рівності перетворюється в безумовне, використовуючи множники Лагранжа. Цей метод рішення також простий, але при багатовимірній оптимізації реалізація його утруднена. Крім того, він дозволяє знаходити оптимальні значення цільової функції тільки в точках, де досягається екстремум. Більшість функцій, з якими доводиться мати справу при визначенні оптимальних параметрів процесу металообробки,

досягають найбільшого (найменшого) значення на межі області, тобто там, де екстремум цільової функції не існує.

У роботах [1.196, 1.207, 1.208] для оптимізації режимів різання застосовано метод відсікаючих гіперплощин (метод Келлі), суть якого полягає в заміні нелінійного завдання з обмеженнями послідовністю лінійних задач. Метод Келлі простий, але відрізняється багатокроковістю і тому великими витратами машинного часу. Як і метод невизначених множників Лагранжа, метод відсікаючих гіперплощин недоцільний при рішенні багатопараметричних задач оптимізації.

Ефективний метод – метод геометричного програмування – для визначення оптимальних режимів різання за наявності одного або більшого числа обмежень у вигляді нерівностей використано в роботі [1.185]. В протилежність методам, викладеним вище, метод геометричного програмування спочатку знаходить спосіб розподілу загальної вартості між різними складовими цільової функції, а після цього визначаються значення змінних, що відповідають її оптимальному значенню. Обмежує застосування цього простого і ефективного методу вимога представлення цільової функції і обмежень у вигляді суми позитивних поліномів (позиномів). Крім того, при великій ступені складності задача застосування методу геометричного програмування вимагає використання додаткових чисельних методів знаходження оптимальних змінних. Таким чином, при великому числі обмежень і в той же час малій кількості визначуваних параметрів задачу розв'язати складно.

При визначенні оптимальних режимів різання в [1.177, 1.178] використовується метод послідовної безумовної мінімізації. В цьому випадку задача нелінійного програмування з обмеженнями перетворюється в нелінійну задачу без обмежень шляхом додавання деякої функції штрафу до початкової цільової функції.

Задача оптимізації геометрії інструменту А.І. Кочергін [1.193] вирішує за допомогою теорії статистичних рішень. Щоб скласти матрицю рішень, автор розбиває область зміни геометричних параметрів на декілька часткових областей і знаходить оптимальні значення геометричних параметрів в центрі кожної часткової області.

У основі статистичного методу рішення задачі оптимізації в [1.187] покладено випадковий перебір параметрів в області допустимих значень і визначення знаку приросту оціночної функції при випадковому напрямі пробного кроку.

Статистичні методи визначення оптимальних параметрів досліджуваного процесу точні і універсальні, але вимагають значних витрат машинного часу.

На рис. 1.5 наведено класифікацію методів оптимізації, які доцільно використовувати при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва.

Висновки до розділу та задачі досліджень

Аналіз науково-технічної вітчизняної та зарубіжної літератури показав, що підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва обмежено недостатнім використанням сучасних інформаційних технологій на всіх стадіях технологічного проектування.

Аналіз інформаційних технологій, які використовуються при розв'язанні задач технологічного проектування, встановив, що методи багатовимірного статистичного аналізу з метою зниження розмірності факторного простору, класифікації, групування та розпізнавання образів практично не застосовуються.

Методи розв'язання задач технологічної підготовки виробництва характеризуються використанням обмеженої початкової технологічної інформації, її однобічністю та суб'єктивністю вибору, застосуванням методик, що не у всіх випадках дозволяють отримати оптимальні методи, умови та засоби виготовлення виробів, раціональні технологічні процеси і 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.

Недостатньо досліджені можливості сучасних методів імітаційного та математичного моделювання, а також відсутнє наукове обґрунтування вибору використовуваних в даний час методів розв'язання задач технологічної підготовки виробництва.

Відсутність рекомендацій з використання ефективних методів обробки технологічної інформації та недостатнє застосування сучасних методів багатовимірного статистичного аналізу, параметричного та структурного моделювання й оптимізації при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва викликає необхідність розробки науково обґрунтованих основ використання в технології приладо- та машинобудування сучасних інформаційних технологій, що дають можливість підвищити ефективність приладобудівного виробництва.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі основні наукові та

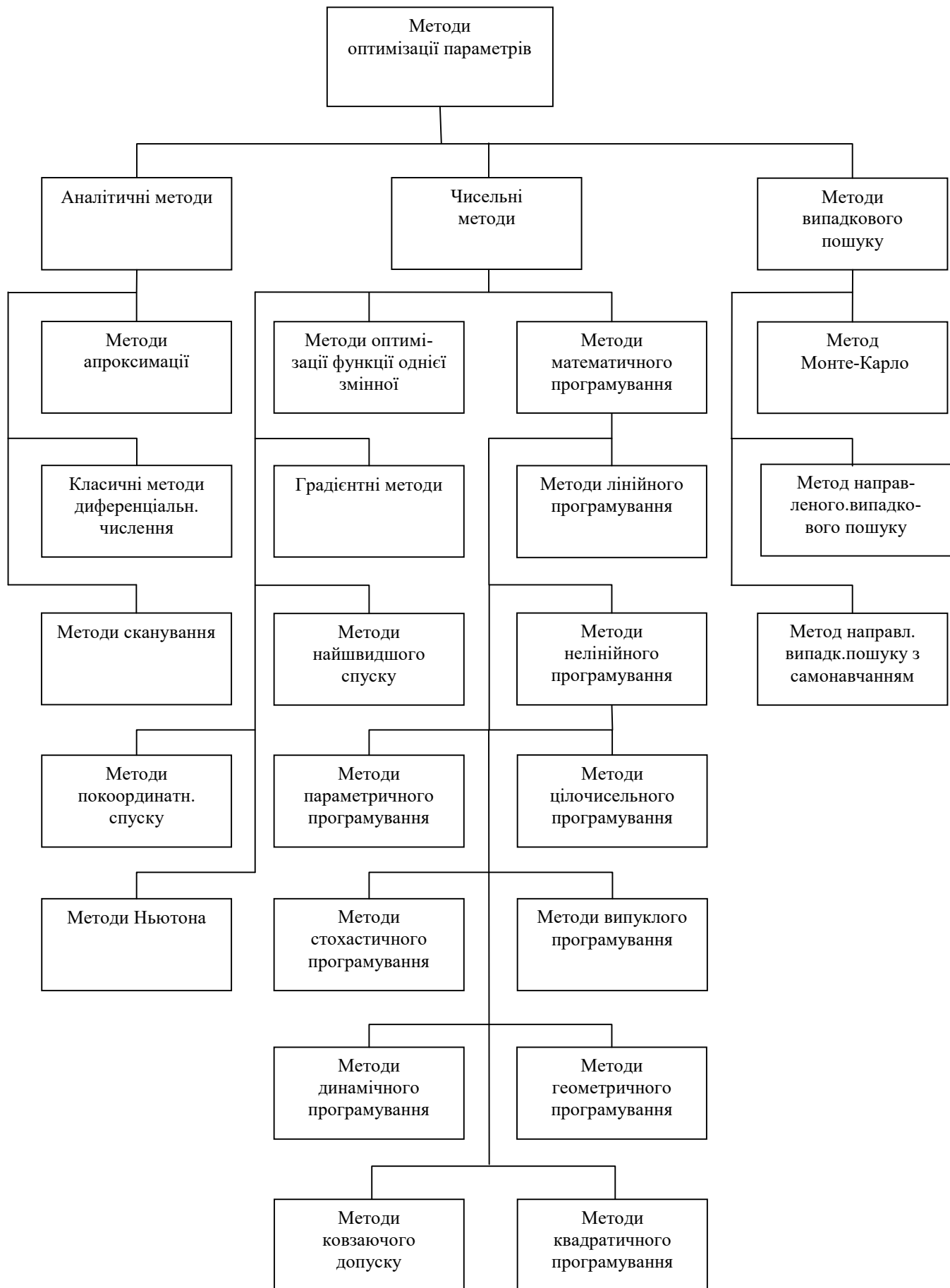


Рис. 1.5. Класифікація методів параметричної оптимізації.

прикладні задачі:

1. На основі аналізу стану інформаційних технологій в приладо- та машинобудуванні обґрунтувати наукові шляхи підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва шляхом раціонального використання технологічної інформації, створення та використання новітніх методів та моделей розв'язання технологічних задач.

2. Розробити методики зниження розмірності факторного простору при розв'язанні технологічних задач, створити відповідні алгоритми та програми, здійснити практичну апробацію цих методик при визначенні фізико-механічних характеристик конструкційних та інструментальних матеріалів.

3. Показати доцільність та ефективність використання методів розпізнавання образів в задачах технологічної підготовки виробництва. Розробити алгоритми та програми дискримінантного та кластерного аналізу технологічної інформації. Виконати практичну апробацію методик розпізнавання образів при автоматизованому проектуванні технології обробки корпусних деталей в приладобудуванні.

4. Отримати класифікаційні та дискримінантні функції для визначених груп конструкційних та інструментальних матеріалів на основі сукупності їх фізико-механічних характеристик.

5. Виконати аналіз методів отримання математичних моделей технологічних параметрів, визначити ефективність їх використання. Обґрунтувати доцільність та ефективність використання сучасних методів евристичного та нейромережевого моделювання при параметричному моделюванні, розробити методики цього моделювання, створити відповідні алгоритми та програми, виконати практичну апробацію вказаних методик при розв'язанні технологічних задач.

6. Виконати аналіз методів параметричної оптимізації, обґрунтувати ефективність використання методів нелінійного та стохастичного програмування для розв'язання оптимізаційних задач при технологічній підготовці виробництва. Обґрунтувати доцільність та розробити алгоритми і програми розв'язання задач багатовимірної оптимізації та виконати їх практичну апробацію.

7. Виконати аналіз методів структурного моделювання та оптимізації, що використовуються при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва. Обґрунтувати доцільність та ефективність методів багатозначної логіки та порядкових визначників і методів мереж Петрі для моделювання та оптимізації завантаження обладнання технологічних виробничих систем. Розробити алгоритми та програми, що реалізують розв'язання цих задач, і виконати їх практичну апробацію.

7. Обґрунтувати необхідність і розробити методики та алгоритми розв'язання задач моделювання конструкції приладів і технологічних процесів їх складання, виконати апробацію цих методик при створенні автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні.

8. Розробити на основі обґрунтованих узагальнень практичні рішення та видати практичні рекомендації щодо використання запропонованих методик

математичного і імітаційного моделювання та оптимізації при розв'язанні різноманітних задач технологічної підготовки виробництва в приладо- та машинобудуванні.

Перелік посилань до розділу 1

- 1.1. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
- 1.2. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Павлов В.В., Рыбаков А.В. Информационно-вычислительные системы в машиностроении. CALS-технологии. – М.: Наука, 2003. – 292 с.
- 1.3. Бродский Л.Л., Вережачка А.С., Рыбаков А.В., Шептунов С.А. Высокие технологии – основа развития современного производства. // Вестник компьютерных и информационных технологий. №6, 2004. – С. 22–32.
- 1.4. Васин С.А., Иноземцев А.Н., Анцев В.Ю. Информационная инфраструктура технологической подготовки производства. // Вестник компьютерных и информационных технологий. №6, 2004. – С. 32–44.
- 1.5. Судов Е.В., Левин А.И. CALS (ИПИ) – технологии в наукоемком машиностроении России и Украины. // Технологические системы, 2004, №2. – С. 63 – 67.
- 1.6. Петраков Ю.В. Перспективы развития автоматизированного проектирования технологических процессов. / Вестник КПИ. Машиностроение, 2005. – С. 38–42.
- 1.7. Михалевич В.С., Каныгин Ю.М., Гриценко В.И. Информатика / АН УССР, Ин-т кибернетики. – Киев, 1983. – 45 с.
- 1.8. Гриценко В.И., Паньшин Б.Н. Информационная технология: вопросы развития и применения / АН УССР, Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. – К.: Наукова думка, 1988. – 272 с.
- 1.9. Вельбицкий И.В. Технология программирования. – К.: Техніка, 1984. – 279 с.
- 1.10. Скурихин В.И. и др. Информационные технологии в испытаниях сложных объектов: Методы и средства. – К.: Наук. думка, 1990. – 320 с.
- 1.11. Информационное обеспечение интегрированных производственных комплексов / В.В. Александров, Ю.С. Вишняков, Л.М. Горская и др.; Под ред. В.В. Александрова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 264 с.
- 1.12. Мидоу Ч. Анализ информационных систем. – М.: Прогресс, 1977. – 400 с.
- 1.13. Гриценко В.И., Паньшин Б.Н. Методологические проблемы анализа развития информационной технологии. – К.: Ин-т кибернетики АН УССР, 1984. – 67 с.
- 1.14. Гриценко В.И., Паньшин Б.Н. Новая информационная технология в организационных системах. / УСМ. – 1988. – №1. – С. 20–27.
- 1.15. Данилевский Ю.Г. и др. Информационная технология в промышленности. / Ю.Г. Данилевский, И.А. Петухов, В.С. Шибанов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 283 с.
- 1.16. Суворов А.В. Методы синтеза информационных технологий в автоматизированных системах. Автореф. д.т.н. – Ростов, 1991. – 32 с.

1.17. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии /АН СССР. – М.: Наука, 1988. – 278 с.

1.18. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 336 с.

1.19. Этли Дж., Кумбс М. Экспертные системы: концепции и примеры. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.

1.20. Довнар Н.А., Зема Т.Г., Ярмош Н.А. Методология проектирования АИС конструкторско-технологического назначения / Под ред. Ю.М. Шамаева. – М.: Наука и техника, 1986. – 191 с.

1.21. Челищев Б.Е. и др. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении /Б.Е. Челищев, И.В. Боброва, А. Гонсалес – Сабатер; Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. –264 с.

1.22. Кондаков А.И. САПР технологических процессов. – М.: Издательский центр „Академия”, 2007. – 272 с.

1.23. Остафьев В.А., Румбешта В.А. и др. Основы технологической подготовки производства приборов. – К.: Выща шк., 1977. – 202 с.

1.24. Остафьев В.А., Держук В.А., Румбешта В.А. и др. Технологические процессы изготовления деталей приборов. – К.: Выща шк., 1983. – 208 с.

1.25. Основные направления развития технологии машиностроения. / Под ред. В.С. Корсакова, Н.М. Капустина. – М.: Библиотека инженера, 1981. – 157 с.

1.26. Коваленко В.С. Современное машиностроение: новые тенденции развития. // Сучасне машинобудування, 2000, №1–2 (3–4). – С. 3–8.

1.27. Коваленко В.С. Микро и нанотехнологии в машиностроении. // Вестник КПИ. Машиностроение, 2005. – С. 42–46.

1.28. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин.– М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

1.29. Капустин Н.М. Кузнецов П.М., Схиртладзе А.Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. – М.: Высшая школа, 2004. – 416 с.

1.30. Фролов В. Н., Львович Я. Е., Меткин Н. П. Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» – М.: Высш. шк., 1991. – 463с.

1.31. Цветков В.Д. Системы автоматизации проектирования технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1972. – 240 с.

1.32. Митрофанов С.П., Гульнов Ю. А., Куликов Д.Д. Автоматизация технологической подготовки производства. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.

1.33. Челищев Б.Е. Автоматизированные системы технологической подготовки производства /Б.Е.Челищев, И.В. Боброва. – М.: Энергия, 1975. – 137 с.

1.34. Павлов В.В. Основы автоматизации проектирования технологических процессов. – М.: МАТИ, 1975. – 72 с.

- 1.35. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении. / Под ред. О.И. Семенкова. Т.1. – Минск: Вышэйш. шк., 1976. Т.1. – 352 с., Т. 2. – 336 с.
- 1.36. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении. / Под ред. Горанского Г.К. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
- 1.37. Лысенко Ю.В., Павлов В.В., Хухорев В.С., Шумакова Л.С. Основы автоматизации проектирования технологических процессов изготовления монолитных элементов, конструкций летательных аппаратов. – М.: МФТИ, 1977. – 51с.
- 1.38. Павлов В.В. Математическое обеспечение САПР в производстве летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: МФТИ, 1978. – 67 с.
- 1.39. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. – Минск: Наука и техника, 1979. – 266 с.
- 1.40. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства. / Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1979. – 247 с.
- 1.41. Горанский Г.К., Бендерова Э.И. Технологическое проектирование в комплексных автоматизированных системах подготовки производства. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
- 1.42. Автоматизация проектирования технологических процессов. / Под ред. О.И. Семенкова. – Минск: ИТК, 1982. – 166 с.
- 1.43. Гавриш А.П., Ефремов А.И. Автоматизация технологической подготовки машиностроительного производства. – К.: Техніка, 1982. – 215 с.
- 1.44. Фролов В.И., Львович Я.Е. Системное проектирование технологических процессов. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1982. – 123 с.
- 1.45. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Автоматизированное проектирование технологии механической обработки на ЭВМ. – Владивосток: ДГУ, 1982. – 80 с.
- 1.46. Капустин Н.М., Павлов В.В., Козлов Л.А. и др. Диалоговое проектирование технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1983. – 255 с.
- 1.47. Куликов Д.Д., Падун Б.С., Яблочков Е.И. Автоматизация проектирования технологических процессов. Уч. пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 83 с.
- 1.48. Аверченков В.И., Камаев В.А. Основы построения САПР. Уч. пос. Волгоград, 1984. – 118 с.
- 1.49. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Автоматизация проектирования процессов механической обработки деталей. – Владивосток, Из-во Дальневост. ун-та, 1984. – 123 с.
- 1.50. Аверченков В.И. Автоматизация проектирования технологических процессов: Учеб. пособие. – Брянск: БИТМ, 1984. – 84 с.

1.51. Корсаков В.С., Капустин Н.М., Темпельгоф К.-Х., Лихтенберг Х. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении. /Под общ. ред. Н. М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1985. – 304 с.

1.52. Соломенцев Ю.М., Остафьев В.А., Выслоух С.П. и др. САПР. Типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов одноинструментальной обработки материалов резанием. Методические рекомендации МР 119-85. – М.: ВНИИНМАШ, 1985. – 120 с.

1.53. Лысенко Э.В., Гербали С.Н. Автоматизация проектирования и управления гибких автоматизированных производств. Учебное пособие / ХАИ им. Н.Е. Жуковского. – Харьков:, 1985 – 81 с.

1.54. Логаишев В.Г. Технологические основы гибких автоматических производств. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 176 с.

1.55. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении /Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров и др. Под ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

1.56. Аллик О.А. САПР. Системы автоматизированного проектирования изделий и технологических процессов в машиностроении. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 319 с.

1.57. Старостин В.Г., Лелюхин В.Е. Формализация проектирования процессов обработки резанием. – М.: Машиностроение, 1986. –136 с.

1.58. Кохан Д., Якобс Ю.Г. Проектирование технологических процессов и переработка информации. – М. Машиностроение, 1981. – 312 с.

1.59. Системы автоматизированного проектирования: Учеб. Пособие для вузов: В 9 кн. Под ред. И.П. Норенкова. Кн. 6: Н.М. Капустин, Г.Н. Васильев. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. – М.: Высш. шк., 1986. – 191 с.

1.60. Технологическая подготовка гибких производственных систем /С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов и др./ Под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1987. –352 с.

1.61. Павлов В.В. Структурное моделирование производственных систем. – М.: Станкин, 1987. – 80 с.

1.62. Скурихин В.И. и др. Автоматизированные системы управления гибкими технологиями. – К.: Техніка, 1987.– 165 с.

1.63. Ступаченко А.А. САПР технологических операций. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 233 с.

1.64. Скурихин В.И. и др. АСУ ТП. Теория и технология автоматизированного проектирования. – К.: Наукова думка, 1988. –281 с.

1.65. Капустин Н.М., Васильев Г.Н. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. / Под ред. И.П. Норенкова. Кн. 6. – М.: Высшая школа, 1988. – 189 с.

1.66. Горанский Г.К. Автоматизированное проектирование единичных и серийных технологических маршрутов обработки деталей. – Л., 1989. – 65 с.

- 1.67. Автоматизация технологической подготовки гибких производств: Сб. научн. труд /АН БССР. Ин-т технической кибернетики: Научн. ред. А.Г. Ракович. – Минск, 1989. – 170 с.
- 1.68. Пуховский Е.С. Технологические основы гибкого автоматизированного производства. Учебн. пособие для студентов машиностроит. спец. вузов. – К.: Вища школа, 1989. – 239 с.
- 1.69. Синельников Ю.Б. Проектирование элементов технологических процессов для гибких производственных систем механической обработки. Автореф. – К.: КПИ, 1989. – 17 с.
- 1.70. Проектирование технологий: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. / Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
- 1.71. Петренко А.И., Семенов О.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования. – К.: Вища школа, 1985. – 296 с.
- 1.72. Хокс Барри. Автоматизированное проектирование и производство. – М.: Мир, 1991. – 296 с.
- 1.73. Митрофанов В.Г. Математическое обеспечение САПР технологической подготовки производства. – М.: Машиностроение, 1991. – 52 с.
- 1.74. Капустин Н.М., Коротаев М.Ю., Цехмейструк В.А. САПР технологических процессов. /Под общ. ред. Н. М. Капустина. – М.: Изд-во ВЗПИ: АО "Росвузнаука", 1992. – 164 с.
- 1.75. Аверченков В.И. и др. САПР технологических процессов, приспособлений и инструментов: Учеб. Пособие для вузов. – Минск: Выш. шк., 1993. – 288 с.
- 1.76. Глоба Л.С., Остафьев В.А., Жданов Б.И. Проектирование интеллектуальных компьютерных технологий для технологической подготовки машиностроительного производства. – К.: НаУКМА., 1996. – 199 с.
- 1.77. Глоба Л.С. Інтелектуальна комп'ютерна технологія конструкторсько-технологічної підготовки механооброблюючого виробництва. Дис. д-р. техн. наук: 05.13.05. – К., 1996. – 310 с.
- 1.78. Горанский Г. К., Губич Л. В., Махнач В. И. и др. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / НАН Беларуси; Институт технической кибернетики. / Под ред. А.Г. Раковича. – Минск, 1997. – 276 с.
- 1.79. Соломенцев Ю.М. Диалоговые САПР технологических процессов. – М.: Машиностроение, 2000. – 232 с.
- 1.80. Новоселов В.В., Иванов В.А., Некрасов Ю.И., Шаходанов Ю.И. Основы технологии и автоматизации проектирования процессов механообработки в машиностроении. Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2000. – 200 с.
- 1.81. Основы автоматизированного машиностроительного производства: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. /Е.Р. Ковальчук, М.Г.

Косов, В.Г. Митрофанов и др.; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш. шк., 2001. – 312 с.

1.82. Капустин Н. М., Дьяконова Н. П., Кузнецов П. М., Автоматизация машиностроения: Учеб. для вузов/под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высш. шк., 2002. – 223 с.

1.83. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 336 с.

1.84. Таратинов О.В. Базров Б.М., Клепиков В.В. Проектирование технологий машиностроения на ЭВМ. – М.: Изд-во МГИУ, 2006. – 519 с.

1.85. Горбатов В.А. Основы дискретной математики. – М.: Высшая школа, 1986. – 310 с.

1.86. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику: Уч. пос. для вузов по спец. «Прикладная математика». – М.: Наука, 1986. – 384 с.

1.87. Кузнецов О.П., Адельсон-Вольский Г.М. Дискретная математика для инженера. – М.: Энергоиздат, 1988. – 479 с.

1.88. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 214 с.

1.89. Бенерджи Р. Теория решения задач. Подход к созданию искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1972. – 224 с.

1.90. Вунш Г. Теория систем. /Пер. с нем. – М.: Советское радио, 1978. – 288 с.

1.91. Шилейко А.В. и др. Введение в информационную теорию систем. /А.В. Шилейко, В.Ф. Кочнев, Ф.Ф. Химушкин; Под ред. А.В. Шилейко. – М.: Радио и связь, 1985. – 278 с.

1.92. Физические основы процесса резания металлов. Под. ред. В.А. Остафьева. – Киев: Вища школа, 1976. – 136 с.

1.93. Скурихин В.И. и др. Математическое моделирование / В.И. Скурихин, В.Б. Шифрин, В.В. Дубровский. – К.: Техніка, 1983. – 270 с.

1.94. Павлов В.В. Математическое моделирование технологических процессов. Методические указания. – М.: МАТИ, 1986. – 72 с.

1.95. САПР. Общие принципы разработки математических моделей объектов проектирования: Методические рекомендации. – М.: ВНИИИНМАШ, 1980. – 190 с.

1.96. Лопушенко В.В., Юревич Р.В. Типові математичні моделі в САПР ТП. Навчальний посібник /Львівський політехнічний інститут. – К.: 1993. – 52 с.

1.97. Малышев Н.Г. и др. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергоиздат, 1991. – 134 с.

1.98. Пухов Г.Е., Хатиашвили Ц.С. Модели технологических процессов. – К.: Техніка, 1974. – 224 с.

1.99. Пухов Г.Е., Хатиашвили Ц.С. Критерии и методы идентификации объектов. – К.: Наукова думка, 1979. – 190 с.

1.100. Перельман И.И. Оперативная идентификация объектов управления. – М.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.

- 1.101. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – К.: Наукова думка, 1990. – 183 с.
- 1.102. Смит Джон М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.
- 1.103. Грубый С.В. Многофакторная аппроксимация полиномиальными моделями экспериментальных зависимостей резания металлов. //Вестник машиностроения, 2000. №9. – С. 29-35.
- 1.104. Безъязычный В.Ф. Автоматизированная система назначения технологических условий механической обработки деталей общего машиностроения. //Справочник. Инженерный журнал №2, 2001. – С. 29-33.
- 1.105. Грубый С.В. Оптимизация режимных параметров на операциях механической обработки. //Технология металлов, 2002, №11. – С. 33-37.
- 1.106. Свиридова Н.Н., Свиридова В.В. Математическая модель оптимального режима обработки материалов резанием. // Машиностроитель, 2004, № 2. – С. 38–40.
- 1.107. Грубый С.В. Разработка методологии управления режимными параметрами и процессом изнашивания инструментов как основы повышения эффективности лезвийной обработки Автореферат дис. на соиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 34 с.
- 1.108. Куратовский К., Мостовский А. Теория множеств. – М.: Мир, 1970. – 416 с.
- 1.109. Автоматика и управление в технических системах: В 11 книгах. / Отв. Ред. С.В. Емельянов, В.С. Михалевич. – К.: Вища шк., 1992. – Кн. 3. Моделирование производственных систем / Б.Ф. Фомин, В.Б. Яковлев; Под ред. В.Б. Яковлева. – 191 с.
- 1.110. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
- 1.111. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. – Київ: , ТОВ „Задруга”, 1999. – 424 с.
- 1.112. Гроп Д. Методы идентификации систем /Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
- 1.113. Математика в САПР: в 2 кн./ Под ред. Н.Г. Волкова, кн. 1. – М.: Мир, 1988. – 206 с, кн. 2. – М.: Мир, 1989. – 260 с.
- 1.114. Бешенков С.А., Ракитина Е.А. Моделирование и формализация: Метод. пособие. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 333с.
- 1.115. Советов Б.Я. Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
- 1.116. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти книгах. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: Учеб. пособие для вузов / С.В. Пантюшин, В.М. Назаров, О.А. Тягунов и др.; Под ред. И.М. Макарова. – М.: Высш.шк., 1986. – 176 с.
- 1.117. Гавриш А.П., Ямпольский Л.С. Гибкие робототехнические системы. – К.: Вища школа, 1989. – 407 с.

1.118. Лищинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.

1.119. Пуховський Е.С. Гнучкі виробничі системи машинобудівного виробництва: Навч. посіб. для студ. машинобудів. спец. вузів /КПІ. – К.: 1991. – 216 с.

1.120. Алгоритмическое, программное и техническое обеспечение гибких производственных систем. / Под ред. Башарина. – Л.: 1988. – 207 с.

1.121. Єфіменко Н.А. Постановка та формулювання задач оптимального управління технологічним процесом машинобудівного виробництва. / Вісник ЧДТУ, 2002, № 2. – С. 9–13.

1.122. Хаустова А.Ф. Формалізація проектних рішень формування структур об'єктів технологічного проектування. Автореф. дис. к.т.н.. Донецький держ. техн. університет.–Донецьк: 2000. – 21 с.

1.123. Wang Hai. Разработка технологических процессов с использованием теории графов. / Jixie zhizao Machinery. 1995, № 9. – С. 23–25 (кит.).

1.124. Способ разработки технологических процессов. Method for deciding of machining. Пат. 5369870 США, МКИ 5B23P13/04. /Ouchi Sadami, Fudjita Satory; Mitsubishi Denki R.R. – №21781.

1.125. Капустин Н.М., Кузнецов П.М. Формирование виртуальной производственной системы для выпуска изделий в распределенных системах.// Машиностроитель. – М.: 2002, вып. 6. – С. 42–46.

1.126. Вакуленко О.С. Розробка та дослідження алгоритмів оперативного планування взаємопов'язаних виробничих процесів в одиничному та дрібносерійному виробництві: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: 2001. – 19 с.

1.127. Кульба В.В., Волков А.Е., Климов А.А., Швецов А.Р. Анализ и синтез систем контроля защиты данных с использованием сетей Петри. – Тольятти: Междунар. акад. бизнеса и банк. дела, 1998. – 239 с.

1.128. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 158 с.

1.129. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984 – 264 с.

1.130. Мамиконов А.Г., Деметрович Я., Кульба В.В. и др. Использование сетей Петри при проектировании систем обработки данных. – М.: Наука, 1988. – 103 с.

1.131. Лескин А.А. Моделирование процессов алгебраическими сетями Петри. – Л.: ЛИИАН, 1987. – 32 с.

1.132. Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении. – Л.: Наука, 1989. – 135 с.

1.133. Васильев В.В., Кузьмук В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. – К.: Наукова думка, 1990. – 212 с.

1.134. Рыжов В.А. Динамические сети Петри. – М.: ВЦ АН СССР, 1988. – 23 с.

1.135. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

- 1.136. Буренков М.В. Синтез структур гнучких обробних модулів на основі імітаційного моделювання: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / НТУ "Харківський політехнічний ін-т". – Х., 2002. – 18 с.
- 1.137. Имитационное моделирование производственных систем. / Под ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. – 416 с.
- 1.138. Лавров А.А. Автоматизация имитационного моделирования ГПС: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: 1990. – 14 с.
- 1.139. Левин В.И. Математические методы в технической кибернетике. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981. – 74 с.
- 1.140. Левин В.И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
- 1.141. Гильман А.М. и др. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1972. – 188 с.
- 1.142. Гонсалес-Сабатер А. Содержание задачи автоматизации процесса проектирования технологии сборки изделия машиностроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. №11, 2001. – С. 14–18.
- 1.143. Гонсалес-Сабатер А. Построение математической модели для автоматизированного решения задач проектирования технологии сборки изделий машиностроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. №1, 2002. – С. 9–13.
- 1.144. Гонсалес-Сабатер А. Построение математической модели для автоматизированного решения задач проектирования технологии сборки изделий машиностроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. №2, 2002. – С. 15–18.
- 1.145. Гонсалес-Сабатер А. Методические основы автоматизации решения задач проектирования технологии сборки. Сборка в машиностроении, приборостроении. № 5, 2002. – С. 3–10.
- 1.146. Сімута Р.Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: Дис. к.т.н.: 05.02.08. – К., 2003. – 176 с.
- 1.147. Григор'єва Н., Шабайкович В. Моделювання автоматичного складання виробів за допомогою графів. //Технічні вісті № 1, 2003. – С. 23–26.
- 1.148. Шабайкович В. Проблеми віртуального автоматичного складання. //Машинознавство. № 7, 2002. – С. 40–42.
- 1.149. Кореньков В. М. Автоматизований синтез маршрутних технологічних процесів складання: Дис. к.т.н.: 05.02.08. – К., 2005. – 171 с.
- 1.150. Давигора В.М. Методика автоматизованого синтезу раціональних порядків складання // Technologia I automatizacja montazu. – Warszawa: OBR TEKOMA. –2001. – №2. – С. 3–10.
- 1.151. Давигора В.М., Кореньков В.М. Формальні процедури розробки послідовності складання виробів // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. Матеріалознавство та машинобудування. – 2002. – № 6. С. 59–68.
- 1.152. Пасічник В.А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва : дис. доктора техн. наук : спец.:05.02.08 - Технологія машинобудування. – К: НТУУ „КПІ”, 2009. – 412 с.

1.153. Максимович Б.Д. Автоматизация проектирования технологических процессов автоматической сборки // *Машиностроитель*. – 1999. – №9.

1.154. Jacobs H.J. Bestimmung kostoptimaler Drehzahlen und Verschiebe beim Drehen mit Schnittüberdeckung. // *Fertigungstechn. und Betrieb*, 1973, 23, №12. – P. 725–727.

1.155. Jakobs H. J., Keszler J., Künanz K., Knorr B., Scheibe W., Krause W. Rationelles Messen und Darstellen des Werkzeugverschleißes für eine Verfahrenoptimierung in der Abspanntechnik. *Fertigungstechn. und betrieb*, 1974, 24, 15. – P. 294–299.

1.156. Jakobs H. J. Möglichkeiten der Prozeßsimulation und Prozeßführung für abspannvorgänge als Grundlage einer technologischen Optimierung. *Wiss Z. Techn. Univ. Dresden*, 1971, 20, N4. – P. 1019–1029.

1.157. Taraman K. S. Multi machining output – multi independent variable turning research by response surface methodology. *Int. J. Prod. Res.*, 1974, 12, №2. – P. 233–245.

1.158. Lambert B. K., Taraman K. Development and utilization of a mathematical model of a turning operation. *Int. J. Prod. Res.*, 1973, 11, N1. – P. 69–81.

1.159. Taraman K. S., Lambert B. A. Surface roughness model for a turning operation. *Int J. Prod. Res.*, 1974, 12, №6. – P. 691–703.

1.160. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. – М.: Мир, 1967 – 470 с.

1.161. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование: Методы последовательной безусловной минимизации. – М.: Мир, 1972. – 240 с.

1.162. Полак Э. Численные методы оптимизации. – М.: Мир, 1974. – 376 с.

1.163. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

1.164. Зангвилл У.И. Нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

1.165. Аоки М. Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования. Пер. с англ. – М.: Наука, 1977. – 334 с.

1.165. Васильев Ф.П. Методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1981. – 400 с.

1.167. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

1.168. Реклейтис Г., Рейвиндрон А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2-х т. Т. 2 – М.: Мир, 1986. – 320 с.

1.169. Цыпкин Я.З. Методы оптимизации сложных систем. – М.: Наука, 1987. – 168 с.

1.170. Венцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Высшая школа, 2001. – 208 с.

1.171. Мину М. Математическое программирование: Теория и алгоритмы. – М.: Наука, 1990. – 448 с

- 1.172. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. – Київ: ВОПІЛ, 2001. – 684 с.
- 1.173. Таха Х.А. Введение в исследование операций. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 912 с.
- 1.174. Zietarski S. Anwendung mathematischer Modelle zum Optimieren der spanenden Fertigung. VDI-Z, 1975, 117, N6. – P. 1–5.
- 1.175. Ham J., Faria-Gonzalez. Production optimization method (POM) using a digital computer. Adv. Mach. Tool Des. and Res., 1970, Vol A. Oxford e.a., 1971. – P. 493–507.
- 1.176. Bhattacharyya A., Faria-Gonzalez R., Ham J. Regression analysis for redichting surface finish and its application in the determination of optimum machining conditions. Trans ASME, 1970, N3. – P. 177–180.
- 1.177. Iwata K., Murotsu Y., Ohba F., Iwatsubo T., Takemori H. Математическое определение оптимальных режимов резания. //Сэймицу кикай, J. Jap. Soc. Precis. Eng., 1975, 41, №5. – P. 420–425.
- 1.178. Iwata K., Miotsu Y., Iwatsubo T., Fujii S. Aprobalistic approach to the determination of the optimum cutting conditions. Trans ASME, 1972, №4, 894. – P. 1099–1107.
- 1.179. Wu S.M., Ermer D.S. Maximum profits the criterion in the determination of the optimum machining conditions. Trans ASME, 1966, №88. – P. 435–442.
- 1.180. Hitomi K. Оптимизация многоступенчатой системы механической обработки. Анализ оптимальных режимов резания для поточной линии. Trans ASME, 1971, №4, B98.
- 1.181. Hitomi K. Оптимизация систем механической обработки. “Кикай-но нэнкю”, Sei Mach., 1973, 25, № 3. – P. 373–377.
- 1.182. Weber H., Schuster R. Aspecte zur Optimierung des Bearbeitungsprozesses beim spanenden Verfahren. // Fertigung und Betrieb, 1975, 25, №4 – P. 213–218.
- 1.183. Selim J.H., Moisan A., Ravignani G.L. An approuch to cost and power optimization in machining. CIRPAnn., 1975, 24, №1. – P. 453–457.
- 1.184. Кюттнер Р.А. Описание процесса резания методами математической статистики. // Тр. Таллинск. политехн. ин-та, 1969, сер.А, №281. – С. 9–22.
- 1.185. Ermer D.S. A beyesin model of machining economics for optimization by adaptive control. Trans ASME, 1971, №4.
- 1.186. Hati S.K., Rao S.S. Determination of optimum machining conditions — deterministic and probabilistic approaches. Trans ASME, 1976, №1, B98.
- 1.187. Луцинский Л.Ю. Оптимизация режимов резания на станках и автоматических линиях на основе применения ЭВМ и УВМ. – М.: НИИмаш, 1974. – 135 с.
- 1.188. Drăghici G., Paltănea C. Optimierungs der Schnittwerte mit Hilfe konvexer Programmierung. Werkz. Masch. Int., 1973, №3. – P. 45–49.
- 1.189. Muransky J. Formulacia a vol'ba optimalizačnych kriterii preposudenie a vol'bu zloznej operacie obrbania. Strjir. Vyroba, 1973, 21, №1. – P. 14–19, 26.

1.190. Prikryl Z. *Optimaler Nutzen von Werkzeugmaschinen vom Werkzeug aus gesehen*. *Fertigung*, 1976, №1. – P. 15–19.

1.191. Prikryl Z. *Szerszámgépek optimális kihasználásának problematikája a szerszám s zemszögéből*. *Gépgyártástechnologia*, 1972, 12, №9. – P. 408–412.

1.192. Ravignani G.L. *Cosierations sur l'optimalisation des conditions de travail dans la coupe des métaux*. *Mech., mater., elec.*, 1973, 277. – P. 25–30.

1.193. Кочергин А. И. *Задачи, возникающие при оптимизации геометрических параметров режущих инструментов и методы их решения*. // *Прогрессивная технология машиностроения*, Вып. 4. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – С. 219–223.

1.194. Zeile H., Michelbach J. *Schneidenvollnutzung zur technischen Optimalität des Metall zerspanens*. *ZWF*, 1974, 69, N10. – P. 478–481.

1.195. Соломенцев Ю. М., Басин А. М. *Методика оптимизации технологического процесса обработки деталей на станках*. / *Вестник машиностроения*, 1974, №6. – С. 62–66.

1.196. Drăghici G., Paltanea C. *Calculation of the cutting rate and the number of tools when using multiple tooling on semiautomatic lathes by means of electronic computers*. *Int. J. Mach. Tool Des. And Res.*, 1974, 14, N1. – P. 13–31.

1.197. Lieralh F., Fischer R., Schieblich W. *Optimierungsmodel zur Auswahl ökonomisch begründeter technologischer Arbeitswerte für spanende Bearbeitungsvorgänge-Zielfunktionen und Lösungsalgorithmus*. *Wiss. Z. Techn. Hachsch. Otto von Guericke Magdeburg*, 1975, 25, N6. – P. 331–338.

1.198. Макаров А. Д. *Оптимизация процессов резания*. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

1.199. Kotuč J. *Prispevok stanoveniu optimalnych resnyck podmienok. Szrojirenstvi*, 1973, 23 N3. – P. 176–178.

1.200. Kotuč J. *Optimalne delba pridavaku na obrabanie a určenie počtu triesok pri pozdlznom sustruzeni*. *Stroinicky čas*, 1974, 25, N23. – P. 306–316.

1.201. Kotuč J. *Prispevok k hospodarnej tranlivosti reznei hrany nástroja*. *Zb. ved. pr. Stroj. fak VST Bratislave*, 1973 (1975). – P. 13, 65–70.

1.202. Hondek J. *Optimalizace reznych podmienok pri soustruzeni na čislocove rizených obrabecích strojích*. *Strojir. Vyroba*, 1975, 23, N10. – P. 717–725.

1.203. Mutel B., Martin P. *Determination “of line” des conditions optimales de coupe*. *Cas du tournage. Méc., matér., élec.*, 1974, 57, N298. – P. 9–13, 47.

1.204. Koren Y., Lenz E. *Optimization and identification of cutting process*. *Pap. ASME*, 1971, NWA/Prod, 24.– 8 p.

1.205. Herman J. *Die Ermittlung von optimalen Schnittbedingungen mit Hilfe der multiplen linear Regressionsanalyse*. *ZWF*, 1974, N4. – P. 68, 159–162.

1.206. Горфинкель Д.Я. *Оптимизация режимов резания с помощью метода математического программирования Фиакко и Мак-Кормика*. // *Сб. Вычислительная техника в машиностроении*. – Минск: Изд-во АН БССР, 1970. – С. 114–124.

1.207. Drăghici G., Paltănea C. *Practische Anwendung der Schnittwertoptimierung mit Hilfe konvexer Programierung*. *“Werkz. Masch. Int.”*, 1973, N5. – P. 31–33.

1.208. Ivan V. N. Programanera algoritulyj simplx pecalculatoare electronice in vederea calculului regimurilor optime de aschniere. *Bul. Univ. Brasov*, 1972, Z14. – P. 407–416.

1.209. Ямпольский Л.С., Полищук М.Н. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах. – К.: Техніка, 1988. – 175 с.

1.210. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки /АН УССР, Ин-т сверхтвердых материалов. – К.: Наук. думка, 1989. –192 с.

1.211. Brocek M.J. Cutting conditions optimization when turning overlays. / *J. Mater. Proces. Technol.* 2005, 168, N 3. – C. 488–495.

1.212. Alberti M., Ciurano J. A system for optimizing cutting parameters when planning milling operations in high- speed machining. / *J. Mater. Proces. Technol.* 2005, 168, N 1. – C. 25–35.

1.213. Franci J. Approach to optimization of cutting conditions bu using artifical neural networks. /*J. Mater. Proces. Technol.* 2006, 173, N 3. – C. 281–290.

1.214. Cokir Cemal M. Development of knowledge- based expert system for solving metal cutting problems. / *Mater. And Des.* 2006, 27, N 10. – C. 1027-1034.

1.215. Keng Dechun. Cutting mode and computer – aided performance predictive model for ball-end milling cutter. / *China Mech. Eng.* 2002, 12, N 24. – C. 2108 – 2110.

1.216. El.-Mounoyri H. Optimization of CNC ball end milling: a neural network – based model. / *J. Mater. Proces. Technol.* 2005, 166, N 1. – C. 50–52.

1.217. Ahmad Nafis, Tanaka Tomohisa, Saito Yoshio. Cutting parameters optimization and constraints instigation for turning process by GA with organizing adaptive penalty strategy. / *SME Int. J. C.* 2006, 49, N2. – C. 293–300

РОЗДІЛ 2

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 [2.1 – 2.34].

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.

2.1 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 [2.1 – 2.4, 2.7, 2.9, 2.12, 2.15, 2.17, 2.20, 2.21, 2.23, 2.25, 2.29, 2.30]. 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 скласти „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

приведе 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:

$$y_j = a_{j1}f_1 + a_{j2}f_2 + \dots + a_{jn}f_n, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (2.1)$$

де кожний з параметрів лінійно залежить від n некорельованих між собою компонентів (факторів) f_1, f_2, \dots, 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 ґрунтуються на величині долі відтворюваної дисперсії. Критерії значимості „оперують” з вибірковою змінністю даних. Критерії, що ґрунтуються на власних числах,

формулюються 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, що викладена в [2.1 – 2.3, 2.9, 2.13 – 2.16, 2.20, 2.21, 2.25] розроблено алгоритм факторного аналізу (рис. 2.1), який програмно реалізований й апробований при обробці різноманітної технологічної інформації [2.35 – 2.40].

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 $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=10^\circ$, $\lambda=0^\circ$, $\alpha=8^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $r=1$ мм та режимами різання $V=16\ldots45$ м/хв., $s=0,2$ мм/об, $t=1\ldots4,5$ 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, значення яких для кожного інструментального матеріалу наведено в таблиці 2.2.

Обробка результатів експериментальних досліджень з метою отримання залежності

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

наведена в розділі 4.

Використання визначених факторів дозволило зменшити кількість експериментів по меншій мірі з 128 до 16 (при використанні повного

Таблиця 2.1

Власні значення та відповідні їм дисперсії, що визначають інформативність факторів вольфрамових твердих сплавів

№ факто- ру	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		

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:

$$x_{li} = a_{il} * f_{l1} + a_{i2} * f_{l2},$$

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, що наведені в таблиці 2.3.

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 Si , 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 2.4.

В таблиці А.1 додатку А наведено значення факторів для кожного найменування вуглецевої якісної конструкційної сталі.

Таким чином, замість залежності

$$Y = F(V, s, t, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9),$$

де $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ – відповідно нормовані значення кількості вуглецю C , марганцю Mn , кремнію Si , хрому Cr в досліджуваному матеріалі та його фізико-механічні властивості R_{eH} , R_m , A , Z , HB , отримано можливість представити вихідні параметри процесу різання як

$$Y = F_1(V, s, t, f_1, f_2).$$

Вказана заміна дозволяє врахувати в отриманій моделі 81,58% інформації про хімічний склад і фізико-механічні властивості досліджуваного матеріалу (таблиця 2.5), зменшити кількість експериментів та час на їх проведення, знизити витрати оброблюваного й інструментального матеріалів і енергетичні витрати.

Таблиця 2.2

Значення факторів, що характеризують хімічний склад та фізико-механічні властивості вольфрамових твердих сплавів

№ п/п	Інструментальний матеріал	Латентні фактори	
		f_1	f_2
1	BK3	1,36149	-0,34050
2	BK3M	1,36149	-0,34050
3	BK4	0,96775	-0,53012
4	BK4B	0,96775	-0,53012
5	BK6	0,61754	-0,48490
6	BK6M	0,79366	-0,37340
7	BK6OM	0,98314	2,93859
8	BK6B	0,57381	-0,52734
9	BK8	0,26732	-0,43967
10	BK8B	0,13614	-0,56701
11	BK8BK	0,13614	-0,56701
12	BK10	-0,03916	-0,35200
13	BK10M	0,09202	-0,22465
14	BK10OM	0,28271	3,02904
15	BK10KC	-0,12662	-0,43689
16	BK11B	-0,34667	-0,39843
17	BK11BK	-0,48151	-0,35088
18	BK15	-0,82724	-0,15404
19	BK20	-1,57038	0,02808
20	BK20KC	-1,65783	-0,05682
21	BK20K	-1,22056	0,36766
22	BK25	-2,27100	0,31093

Таблиця 2.3

**Значення факторних навантажень для факторів, що характеризують
вольфрамові тверді сплави**

№ п/п	Властивості матеріалу	Факторні навантаження	
		a_{i1}	a_{i2}
1	Co	-0,989	0,086
2	Wc	0,980	-0,203
3	Tac	0,175	0,747
4	R_m	-0,812	-0,272
5	Густина	0,993	-0,067

Таблиця 2.4

**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

Таблиця 2.5

**Власні значення та відповідні їм дисперсії, що визначають
інформативність факторів вуглецевих якісних конструкційних сталей**

№ факто- ру	Початкові власні значення та відповідні їм дисперсії			Дисперсії значимих компонент	
	Всього	% дисперсії	% накопичення	% дисперсії	% накопичення
1	6,779	75,320	75,320	73,934	73,934
2	1,020	11,330	86,650	7,650	81,584
3	0,520	5,778	92,427		
4	0,365	4,057	96,484		
5	0,283	3,150	99,634		
6	0,017	0,193	99,827		
7	0,009	0,100	99,927		
8	0,005	0,050	99,977		
9	0,002	0,023	100,000		

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:

$$x_{li} = a_{i1} * f_{l1} + a_{i2} * f_{l2} + a_{i3} * f_{l3} + a_{i4} * f_{l4}, \quad l=1, \dots, 20, \quad i=1, 2, \dots, 14,$$

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

Значення факторних навантажень для кожної властивості досліджуваного матеріалу наведено в таблиці 2.6.

На рис. 2.2 наведено графік залежності власних чисел λ кореляційної матриці від номера отриманого фактора (латентної змінної). В таблиці А.2 Додатку А наведено значення факторів (латентних змінних), що з вказаною інформативністю відображають фізико - механічні властивості та хімічний склад низьколегованих конструкційних сталей.

Таблиця 2.6

Значення факторних навантажень факторів для низьколегованих конструкційних сталей

№ п/п	Хім.скл., фіз.мех.вл.	Факторні навантаження			
		a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}
1	<i>C</i>	0,685	0,141	0,047	0,725
2	<i>Mn</i>	0,646	-0,564	0,044	-0,346
3	<i>Si</i>	-0,479	0,021	0,893	-0,012
4	<i>P</i>	-0,351	0,360	-0,327	-0,007
5	<i>Cr</i>	-0,549	0,667	-0,023	0,141
6	<i>Ni</i>	-0,611	0,760	0,037	-0,019
7	<i>Cu</i>	-0,499	0,780	-0,024	-0,122
8	<i>V</i>	0,845	0,372	-0,016	-0,016
9	<i>Nb</i>	0,010	-0,110	-0,174	-0,294
10	<i>N</i>	0,744	0,350	0,032	-0,037
11	<i>Al</i>	-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

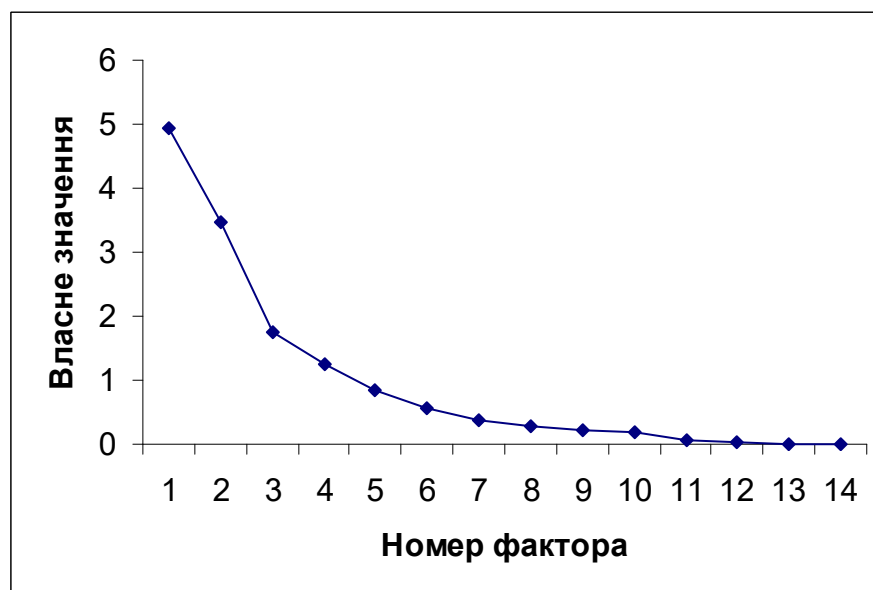


Рис. 2.2. Графік залежності власного значення λ кореляційної матриці параметрів низьколегованих конструкційних сталей від номера фактора (латентної змінної).

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 ПК.

2.2 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 [2.1, 2.2, 2.13 – 2.16, 2.20, 2.30, 2.32 – 2.34]. 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.

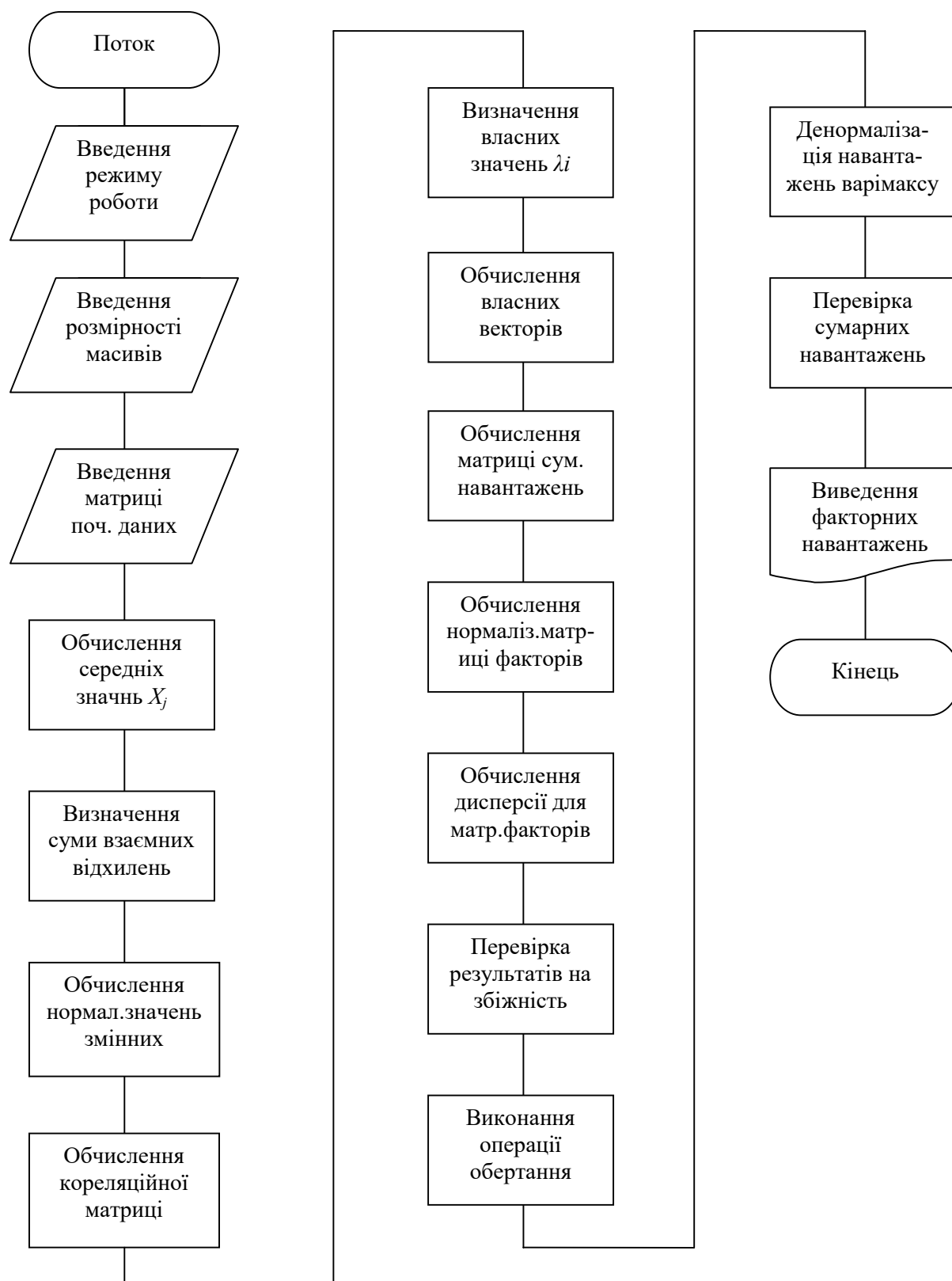


Рис. 2.1. Узагальнена схема алгоритму факторного аналізу даних.

У нашій країні метод головних компонентів став поширюватися з появою ЕОМ 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 [2.1] 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 проєкції 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:

$$f_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} y_i, \quad (2.2)$$

де i – номер ознаки, $i=1,2,\dots,n$;

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

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 k як:

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

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.

Згідно з методикою компонентного аналізу інформації розроблено алгоритм рішення цієї задачі, який наведено на рисунку 2.3 та виконано його програмну реалізацію й апробацію при розв'язанні технологічних задач.

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” [2.41].

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 оброблених матеріалів наведено в таблиці 2.7. 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 звужити 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_i , яка більше або дорівнює одиниці.

Дисперсії компонент (таблиця 2.8), 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 оброблених матеріалів. Залежність власних чисел від номера головної компоненти наведено на рис.2.4.

Таблиця 2.8

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 2.9. Ці коефіцієнти формують залежності головних компонент від початкових параметрів – хімічного складу та фізико-механічних властивостей легуваних сталей, з яких виготовляються деталі:

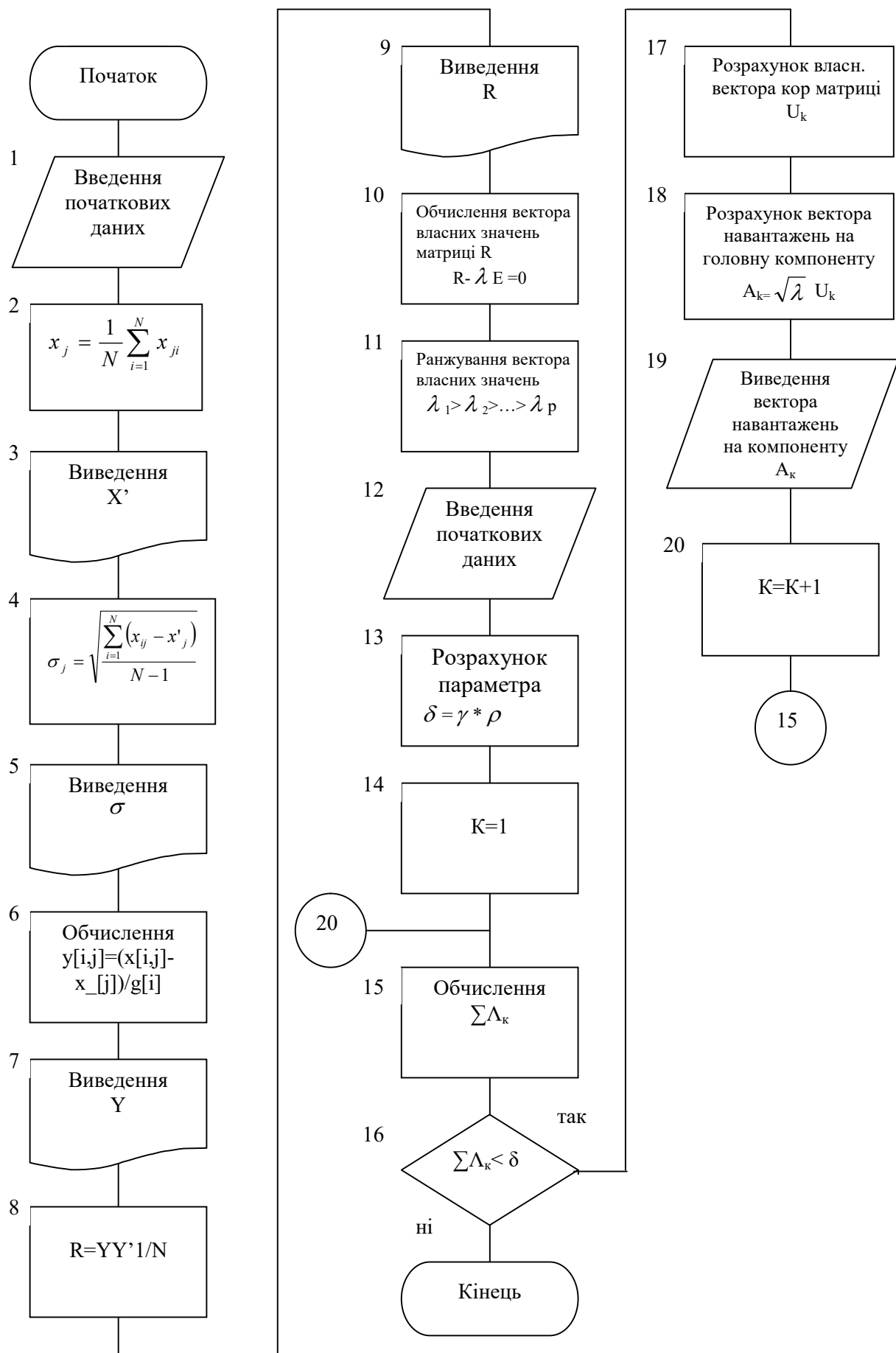


Рис. 2.3. Узагальнена схема алгоритму компонентного аналізу даних.

Таблиця 2.7

Значення параметрів інформаційного масиву „Вхід”

№п.п.	Хімічний склад та фізико-механічні властивості матеріалів оброблюваних деталей																
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>Зерн.</i>	<i>HB</i>	<i>R_m</i>	<i>R_{eH}</i>	<i>R_{p0,2}</i>	<i>S_k</i>	<i>A</i>	<i>Z</i>
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

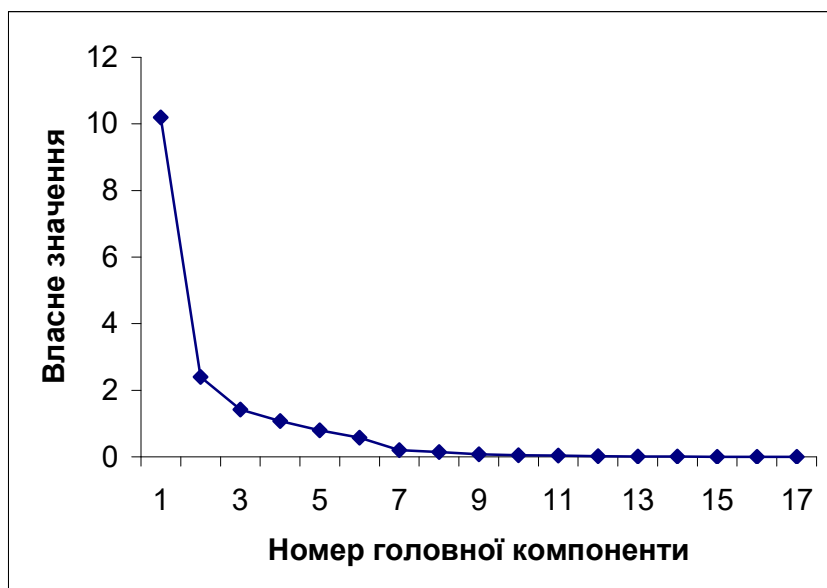


Рис. 2.4. Графік відповідності власного значення номеру головної компоненти параметрів інформаційної моделі „Вхід”.

Таблиця 2.9

Значення навантажень на головні компоненти інформаційної моделі „Вхід”

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

$$f_{kj} = \sum_{i=1}^{17} a_{ij} y_{ki}$$

$$j = 1, \dots, 4, \quad k = 1, \dots, 15, \quad (2.4)$$

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.

Ефективність застосування компонентного аналізу в технологічних дослідженнях покажемо при визначенні оброблюваності титанових сплавів ВТЗ - 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 2.10 наведено значення вагових коефіцієнтів (навантажень) на головні компоненти, які дозволять визначити головні компоненти f_j , $j=1, \dots, 5$.

В таблицях. А.3 та А.4 додатку А надано значення головних компонент при стисненні масивів інформації про хімічний склад та фізико-механічні характеристики легованих сталей та інструментальних твердих сплавів, які доцільно використовувати при моделюванні технологічних процесів, що використовують вказані матеріали.

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 2.10

Значення навантажень на головні компоненти характеристик титанових сплавів

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

2.3 Багатовимірне шкакування

Багатовимірне шкакування 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 шкакування одержали свій розвиток в останні три десятиліття, що пов'язане з інтенсивним удосконалюванням у цей період обчислювальної техніки [2.20, 2.42 – 2.51].

За своїм походженням багатовимірне шкакування 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 значення 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 шкакування 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 шкакування 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 шкакування 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 ЕОМ, 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 багатовимірного шкалювання 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.

2.3.1 Моделі багатовимірного шкалювання

В основу багатовимірного шкалювання 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:

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

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:

$$d_{jk} = \sum_t x_{jt} \cdot x_{kt} \quad (2.6)$$

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

2.3.2 Метричний і не метричний підходи до шкалювання

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 шкалювання можна поставити таким чином. Нехай задана симетрична матриця D розходжень D_{ij} між об'єктами:

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

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

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

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

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

була згідно деякому критерію близька до вихідної матриці розходжень.

Термін “багатовимірне шкакування” був введений Торгерсоном. Торгерсон перший розробив формальну процедуру, що опирається на обчислення власних значень матриці, і назвав її метричним багатомірним шкакуванням [2.42, 2.43]. 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 шкакуванням [2.20, 2.45, 2.48 – 2.50]. Цей термін прижився й надалі використовується іншими авторами.

Розглянемо два підходи до шкакування.

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.

2.3.3 Методи ортогонального шкалювання

Проста ординація Орлочі. Найпростішим методом багатовимірною шкалювання (якщо не вважати проектування в підпростір, утворений деякими з вихідних осей) є проста ординація Орлочі [2.42, 2.44, 2.46]. 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 $D_{12} = \max D_{ij}$. 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.

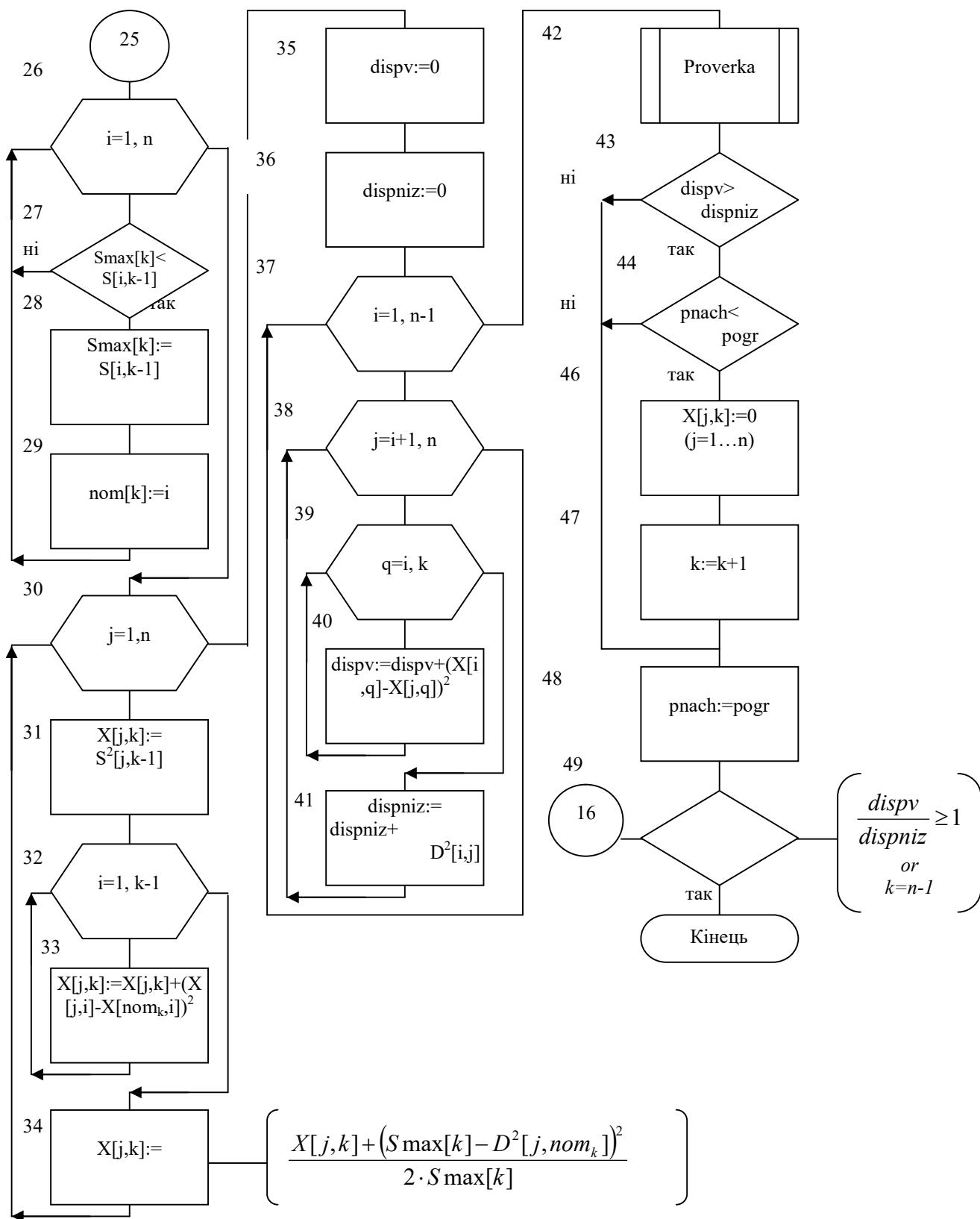
Недоліком простої ординації є те, що результуючий простір визначається всього по декількох точках, тому окремі ізольовані точки можуть повністю визначити рішення. Потрібно, щоб положення площини визначалося розкидом всієї сукупності точок. Така постановка завдання буде розглядатися нижче.

Розроблено схему алгоритму методу простої ординації Орлочі, яку наведено на рис. 2.5.

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



Продовження рис. 2.5.

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.

Узагальнену схему алгоритму, що реалізує метод головних проєкцій Торгерсона, наведено на рис. 2.6.

2.3.4 Нелінійні методи зниження розмірності даних

Нелінійні методи багатовимірного шкалювання базуються на мінімізації вибраного критерію [2.20, 2.45, 2.50, 2.51]. 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.

Градiєнтна 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 проєкції 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 $g_i = -\{\partial S / \partial x_{ik}^i\}$, а саме перехід до нової конфігурації, обумовленої координатами:

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

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:

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

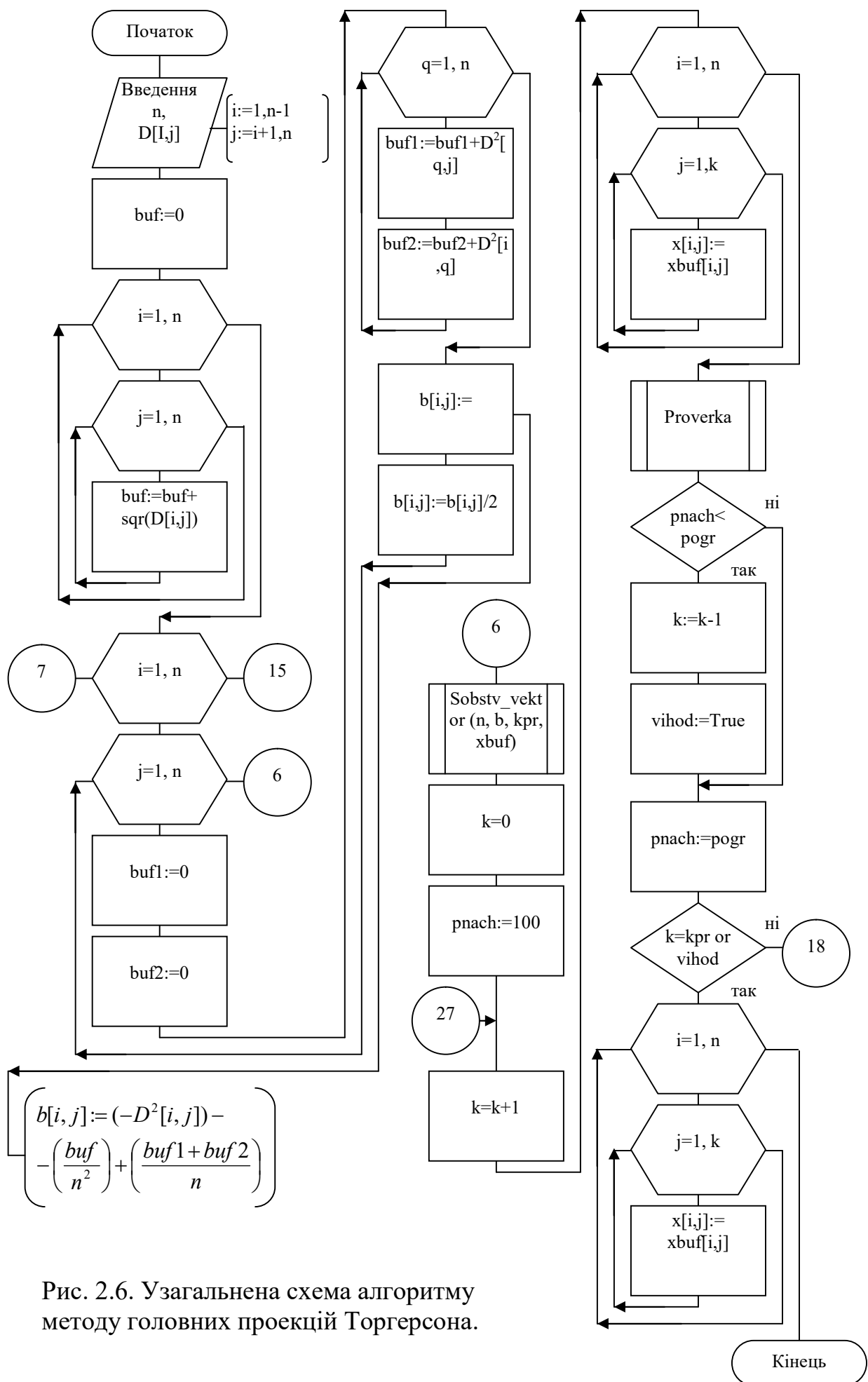


Рис. 2.6. Узагальнена схема алгоритму методу головних проєкцій Торгерсона.

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

Методика використання градієнтної мінімізації в багатовимірному шкалюванні представлена у вигляді алгоритму, схема якого наведена на рис. 2.7.

2.3.5 Метричне шкалювання неметричних даних

При неметричному підході до багатовимірного шкалювання 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 неметричний підхід до багатовимірного шкалювання, що приводить до метричного результату. Всі попередні автори вирішували задачу шкалювання 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.

Згідно з методикою багатовимірного шкалювання, що запропонована Шепардом, розроблені алгоритми методів ортогонального проектування, а саме метричного шкалювання неметричних даних які наведено на рис. 2.8.

Наведемо приклад використання багатовимірного шкалювання для обробки масиву параметрів „Вхід”, значення параметрів якого представлено в таблиці 2.7.

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 2.11). Таким чином досліджувані деталі, що характеризуються хімічним складом та фізико-механічними характеристиками, можна представити координатами точок в дев'ятивимірному просторі. При цьому кожна наступна координата збільшує інформативність представлення початкових даних. Із таблиці 2.12, що отримана в результаті використання методу шкалювання, 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

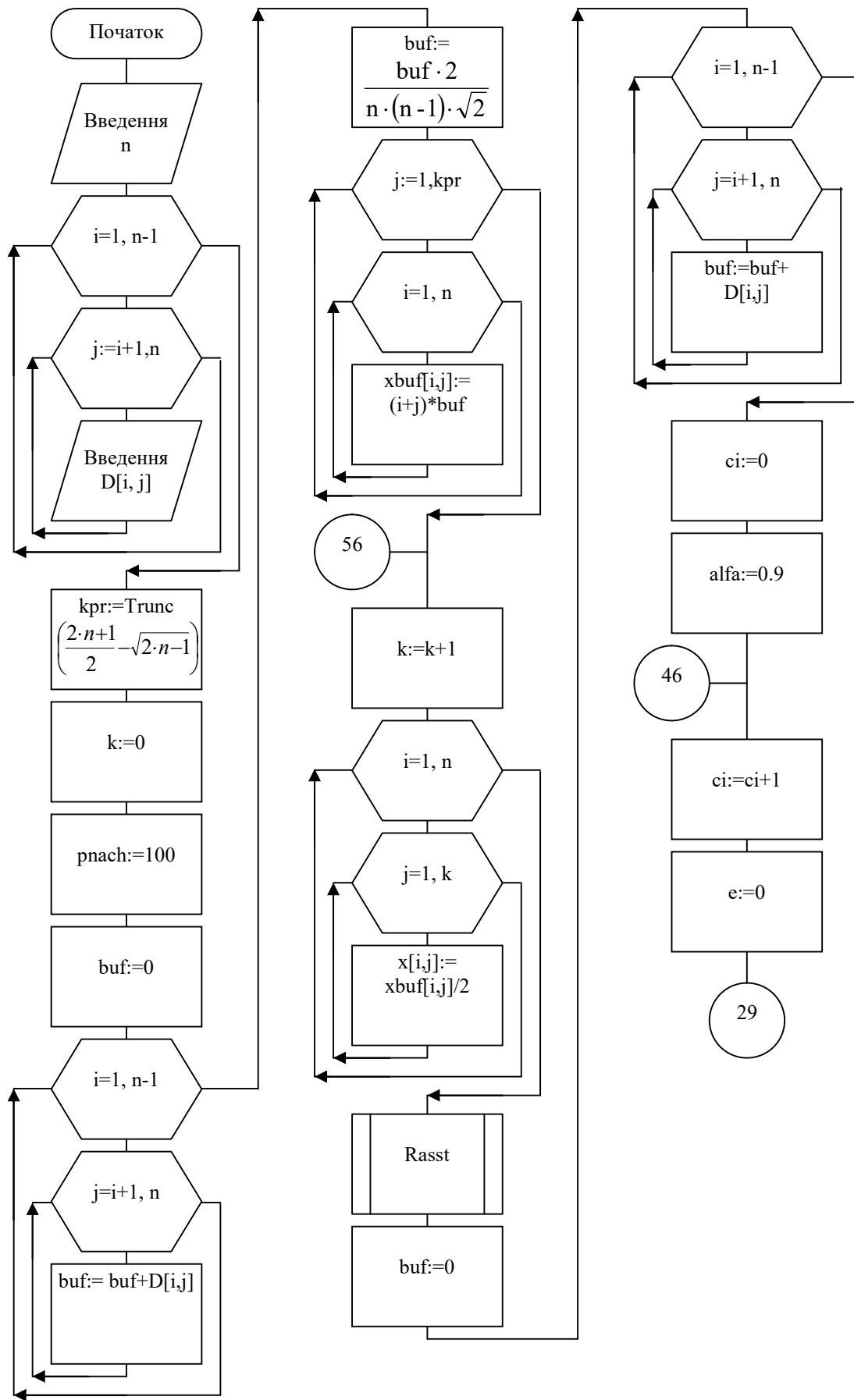
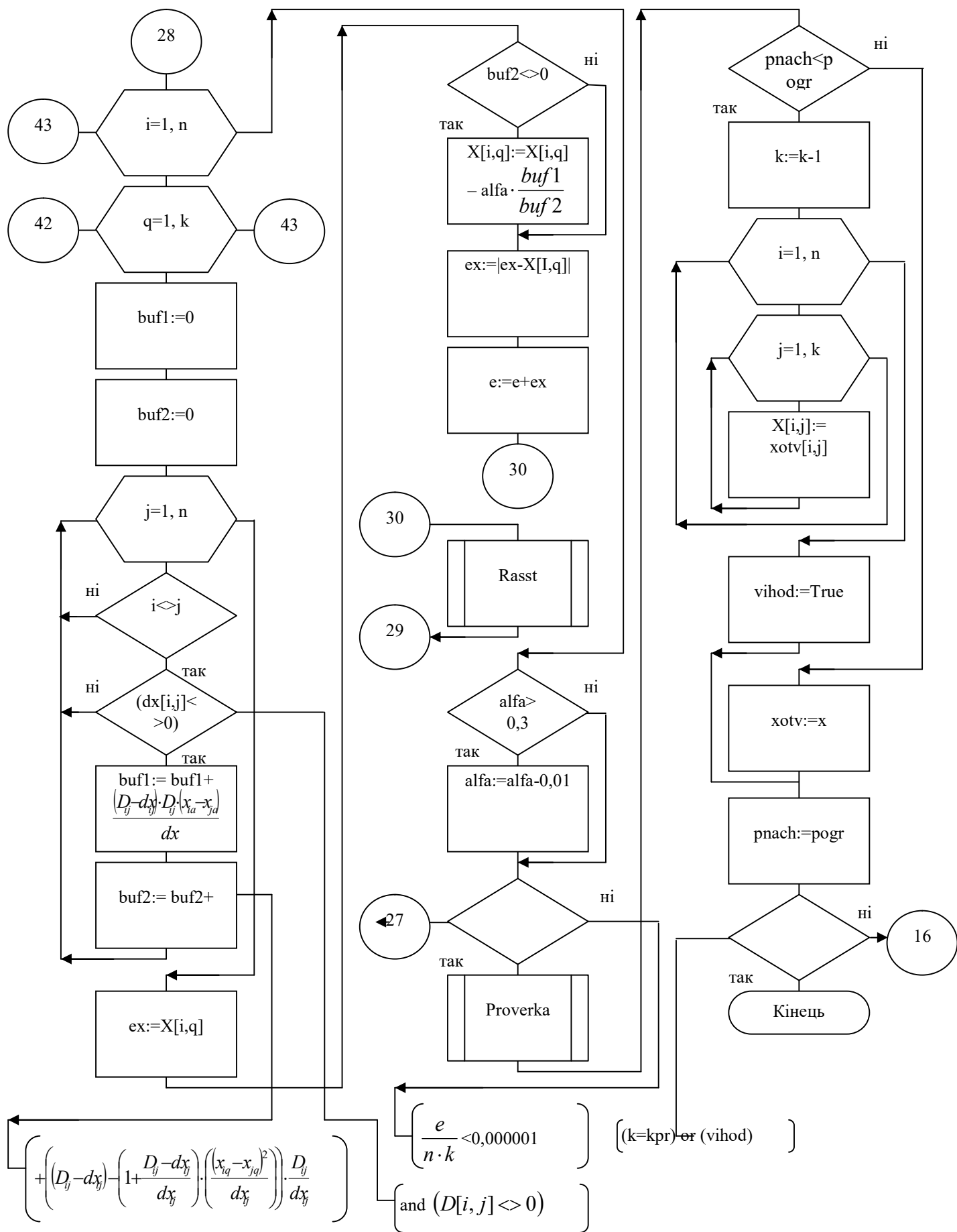


Рис. 2.7. Узагальнена схема алгоритму методу градієнтної мінімізації в багатовимірному шкалюванні.



Продовження рис. 2.7.

(трьома числами), що містять 95,7% інформації, яка закладена в початковій інформації.

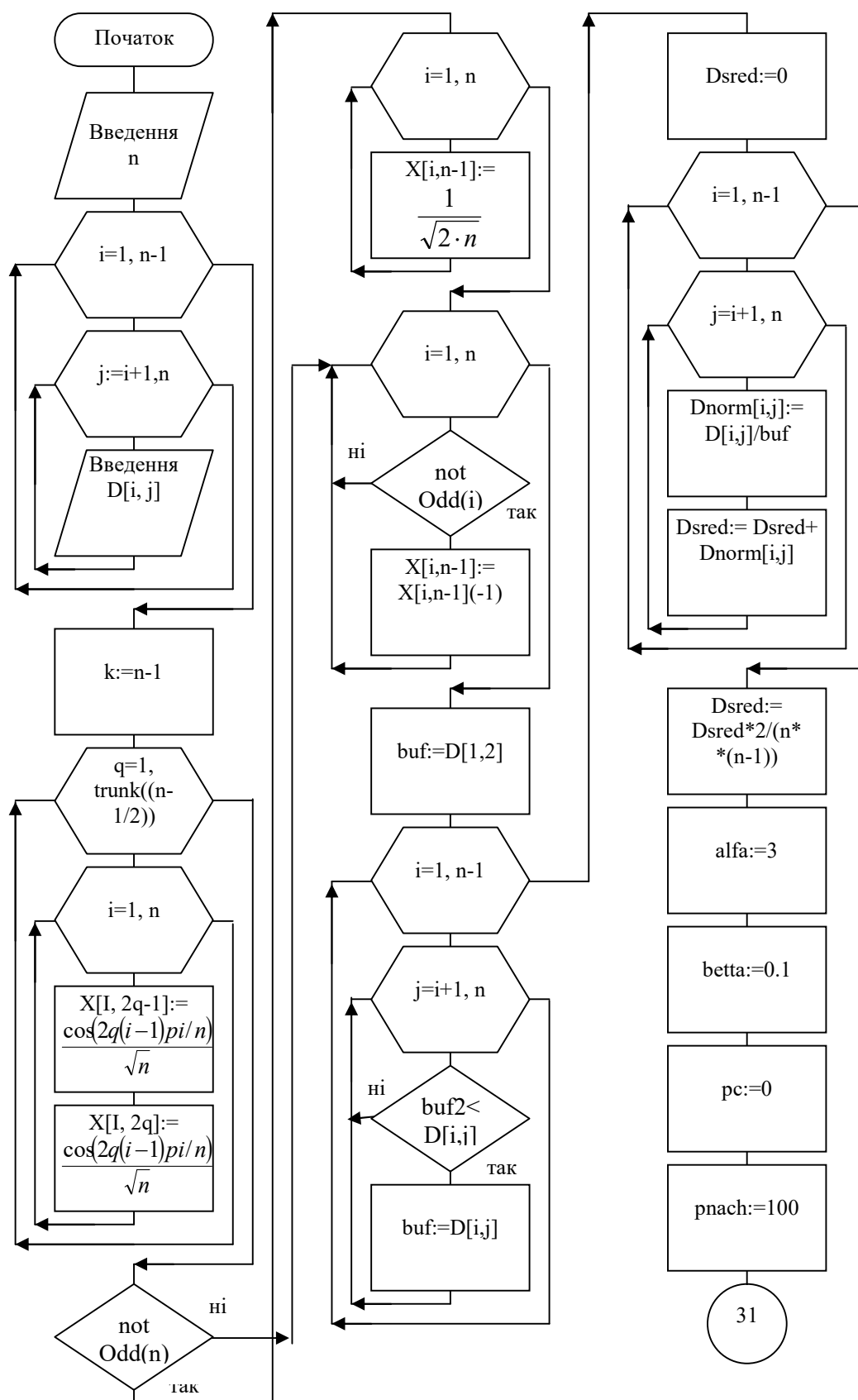
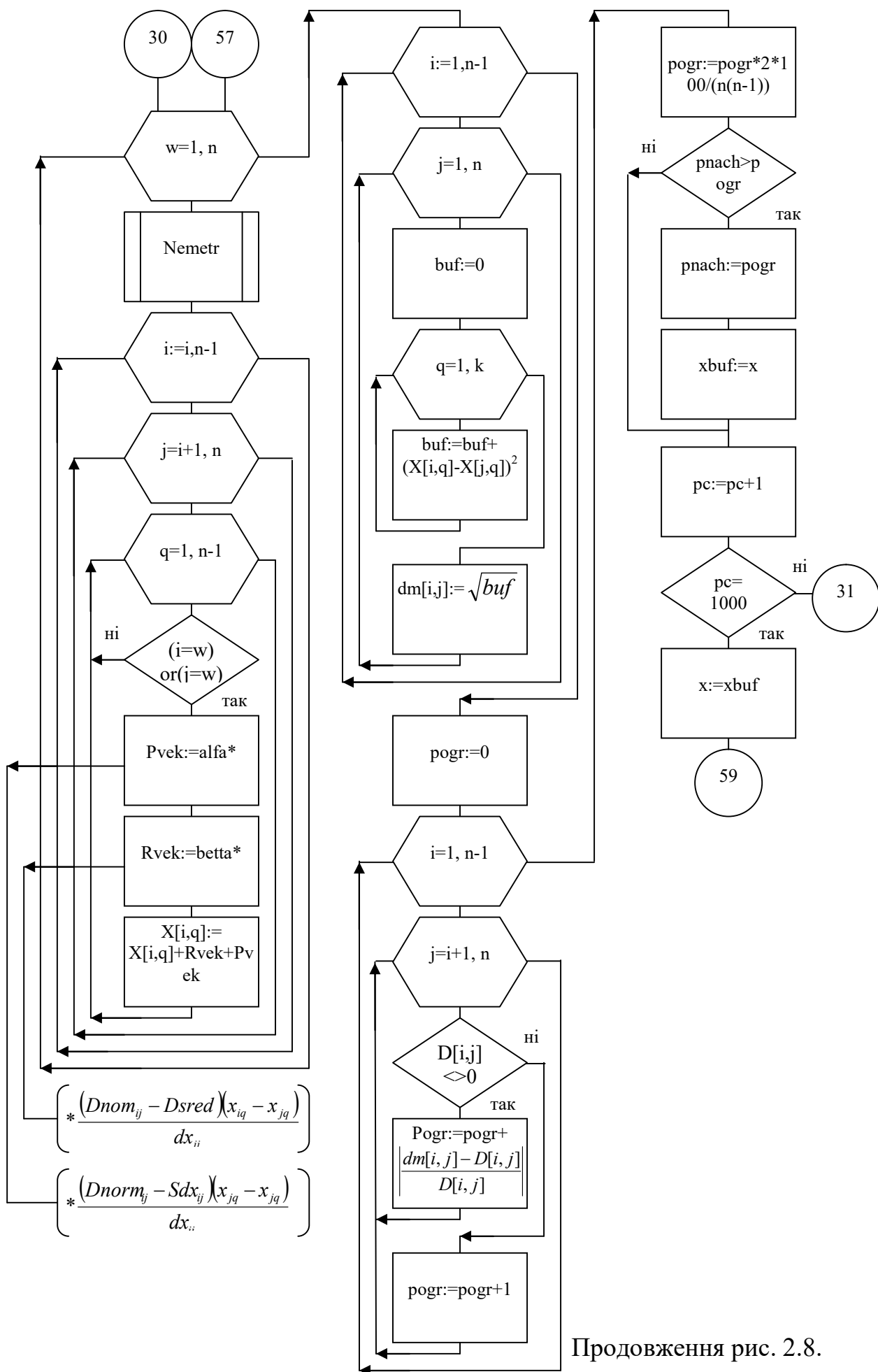
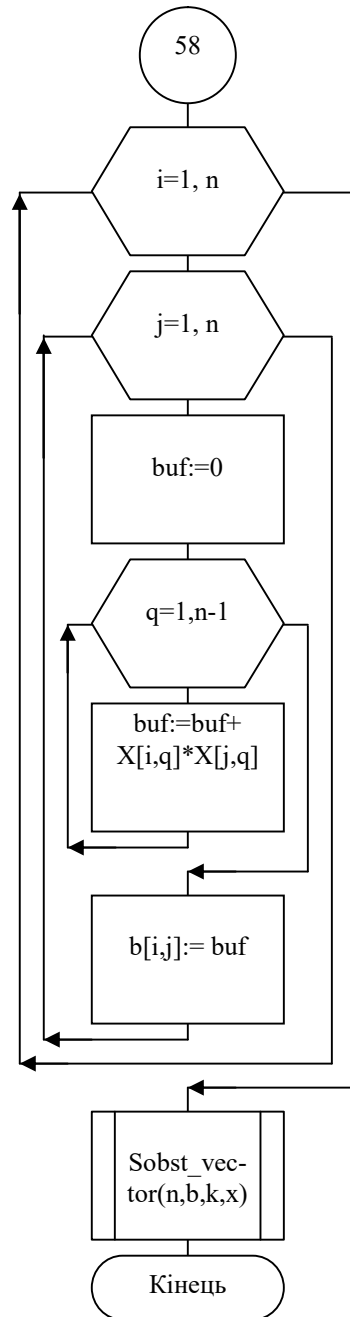


Рис. 2.8. Схема алгоритму метричного шкалювання неметричних даних (метод близькостей Шепарда).



Продовження рис. 2.8.



Продовження рис.2.8.

На рис 2.9 наведено розташування в дво- та трьохвимірному просторах точок, що відповідають параметрам матеріалів деталей інформаційної моделі „Вхід”, значення яких надано в таблиці 2.7, а результати обробки за методом простої ординації Орлочі – в таблиці 2.11. При цьому сумарна похибка представлення параметрів матеріалів деталей точками в двовимірному просторі (таблиця 2.12) не перевищує 8,2 %, а в трьохвимірному просторі – 4,3%. Із рисунку 2.9 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.

Таблиця 2.11.

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 2.12

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 шкалювання інформації дозволяє зробити наступні висновки:

1. Багатовимірне шкалювання 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 шкалювання 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 шкалювання, а в іншому – неметричного шкалювання.

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

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

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

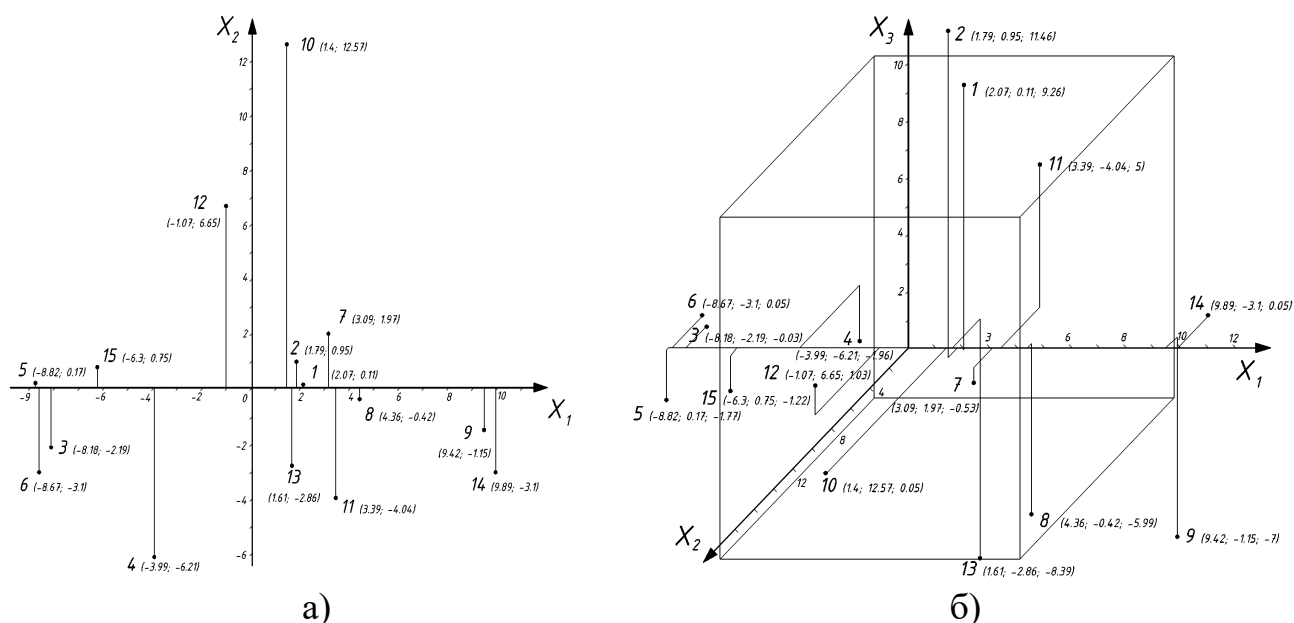


Рис. 2.9. Розташування координат точок, що характеризують хімічний склад та фізико-механічні характеристики оброблюваних деталей інформаційної моделі „Вхід”:

- а) в двовимірному просторі;
- б) в трьохвимірному просторі.

Висновки до розділу

Застосування методів багатовимірного статистичного аналізу – методів факторного й компонентного аналізу та методів багатовимірного шкалювання, 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. 2.10 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.

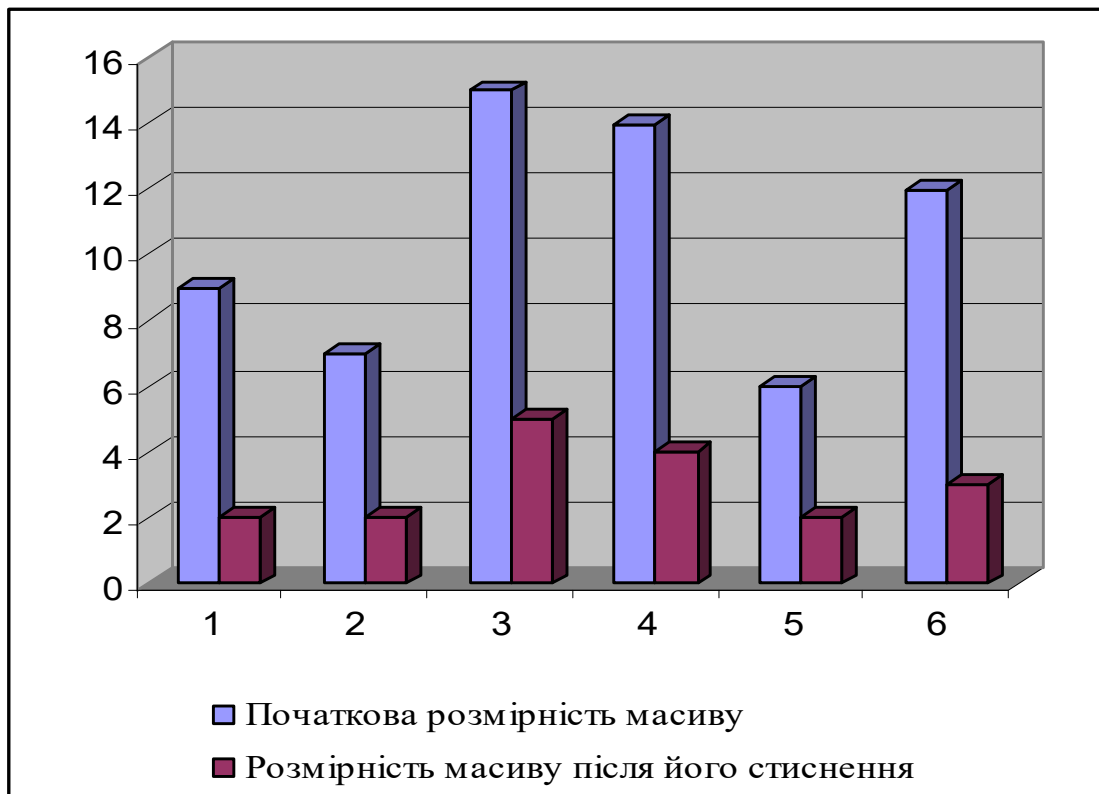


Рис. 2.10. Порівняльні значення розмірностей масивів початкової інформації до та після її стиснення:

- 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 багатовимірною шкалювання 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) розроблені алгоритми та програми факторного та компонентного аналізу доцільно включити в підсистему розрахунків режимів різання та нормування процесів обробки матеріалів різанням в якості програмного модуля САПР ТП, який дозволить врахувати всі характеристики оброблюваного та інструментального матеріалів та отримати більш якісні результати технологічного проектування.

Перелік посилань до розділу 2

- 2.1. Лоули Д. Н., Максвелл А. Э. Факторный анализ как статистический метод. Пер с англ. Ю. Н. Благовещенского. – М.: Мир, 1967. – 146 с.
- 2.2. Харман Г. Современный факторный анализ /Пер. с англ. – М.: Статистика, 1972. – 488 с.
- 2.3. Окунь Я. Факторный анализ. – М.: Статистика, 1974. – 200 с.
- 2.4. Длин А.М. Факторный анализ в производстве. – М.: Статистика, 1975. – 328 с.
- 2.5. Айвазян С.А. Алгоритмы многомерного статистического анализа и их применения. – М., 1975. – 225 с.
- 2.6. Кендал М.Дж. Многомерный статистический анализ и временные ряды. /М. Кендал, А. Стьюарт; Пер. с англ. Э.Л. Пресмана, В.И. Ротаря. Под ред. А.Н. Колмогорова, Ю.В. Прохорова. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
- 2.7. Адамов В.Е. Факторный индексный анализ. (Методология и проблемы). – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
- 2.8. Больч Б., Хуань К.Дж. Многомерные статистические методы для экономики/ Пер. с англ. – М.: Статистика, 1979. – 317 с.
- 2.9. Иберла К. Факторный анализ / Пер с нем. В. М. Ивановой; Предисл. А. М. Дуброва. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
- 2.10. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях: Методы таксономии и факторного анализа. / Пер. с польск. В.В. Иванова. – М.: Статистика, 1980. – 151 с.
- 2.11. Дубровский С.А. Прикладной многомерный статистический анализ. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 216 с.
- 2.12. Александров В.В., Горский Н.Д. Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1983. – 208 с.
- 2.13. Айвазян С.А. Методы анализа данных. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 357 с.
- 2.14. Айвазян С.А. Прикладной многомерный статистический анализ. – М., 1985. – 392 с.
- 2.15. Айвазян С.А., Енюков И.С, Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
- 2.16. Статистические методы для ЭВМ / Под ред. К. Энслейна, Э. Рэлстоуна, Г.С. Уилфа; Пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 460 с.
- 2.17. Енюков И. С. Методы, алгоритмы, программы многомерного статистического анализа. – М., 1986. – 154 с.
- 2.18. Дубров А.М. Многомерный статистический анализ в экономических исследованиях. – М.: МЭСИ, 1988. – 111с.
- 2.19. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сб. статей; Пер. с англ./ Предисловие Ю.П.Адлера, Ю.В.Кошевника. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 263с.

- 2.20. *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.*
- 2.21. *Благуш П. Факторный анализ с обобщениями /Пер. с чеш. Ю.А. Данилова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 248 с.*
- 2.22. *Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономическом моделировании. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 175 с.*
- 2.23. *Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер с англ. /Дж. – О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др.; Под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.*
- 2.24. *Шараф М.А. и др. Хемометрика / М.А. Шараф, Д.Л. Илмэн, Б.Р. Ковальски; Пер. англ. – Л.: Химия, Ленинград. Отд-ние, 1989. – 269 с.*
- 2.25. *Александров В.В. и др. Анализ данных на ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 191 с.*
- 2.26. *Большаков А.А., Каримов Р.Н. Методы сжатия информации. – Саратов: Сарат. политехн. инст-т, 1991. – 88 с.*
- 2.27. *Адамов В.Е. Экономика и статистика фирм: Уч. пособие для студ. эконом. спец. вузов. Финансы и статистика. 1996. – 240 с.*
- 2.28. *Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.*
- 2.29. *Каримов Р.Н. Обработка экспериментальной информации. Многомерный анализ. Сарат. техн. ун-т, Саратов, 2000. – 104 с.*
- 2.30. *Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2001. – 270 с.*
- 2.31. *Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. (Наука и искусство решения проблем). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 186 с.*
- 2.32. *Андрукович П.Ф. Применение метода главных компонент в практических исследованиях. – М.: Из-во Моск. ун-та, 1973. – 123 с.*
- 2.33. *Дубров А.М. Обработка статистических данных методом главных компонент. – М.: Статистика, 1978. – 135 с.*
- 2.34. *Горькова К.А., Абрамов Ю.Ш. Факторный анализ: Метод главных компонент. Учеб. пособие. – Л.:, 1981. – 66 с.*
- 2.35. *Выслоух С.П. Факторный анализ технологической информации. //Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Выпуск 100. Машиностроение. – Харьков, 2000. – С. 26–29.*
- 2.36. *Выслоух С.П. Снижение размерности, классификация и распознавание образов в технологии приборостроения. //Приладобудування 2002: підсумки і перспективи: Збірник тез науково-технічної конференції. - Київ : МПП “ТЕМП2, 2002. С. 76 – 77.*
- 2.37. *Выслоух С.П. Применение методов многомерного статистического анализа при решении технологических задач. //Материалы двадцать второй ежегодной международной конференции «Композиционные материалы в промышленности». 1-5 июня. Ялта – Киев. УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2002. С. 148 – 150.*

2.38. Вислоух С.П. Распознавание образов, классификация и снижение размерностей при проектировании процессов абразивной обработки. // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сборник статей международной научно-технической конференции. Волжский инженерно-строительный институт (филиал) ВолгГАСА. – Волжский, 2003. – С. 212–216.

2.39. Вислоух С.П. Дослідження взаємозалежності ознак і зниження розмірностей інформаційних масивів в задачах технологічної підготовки виробництва. / Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ „ХПІ”. – Харків, 2007. – Вип.2 (15). – С. 55–63.

2.40. Вислоух С.П. Підвищення інформативності розв’язання технологічних задач. //Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 9-го Международного научно-технического семинара, 23-27 февраля 2009 г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2009. – С. 75-80.

2.41. Антонюк В.С. Методы автоматизированной оценки обрабатываемости для оптимизации процесса резания : дис. канд. техн. наук: спец. : 05.03.01. – К.: КПИ, 1981. – 225 с.

2.42. Torgerson W.S. Multidimensional Scaling. Theory and Method. // *Psychometrika*. -1952, Vol. 17, №4.

2.43. Sammon J.W. A nonlinear mapping for Data Structure Analysis. // *IEEE Trans. Comput.* -1970, Vol. 19, №9.

2.44. Kruscal J.B. Linear transformation of multivariate data to reveal clustering // *Multidimensional Scaling: Theory and Applications in the Behavioral Sciences*. - London: Seminar Press, 1972, Vol. 1. – P. 179–191.

2.45. Каменский В.С. Методы и модели неметрического шкалирования // *Автоматика и телемеханика*. 1977, №8. – С. 118–156.

2.46. Saito T. The problem of the additive Constant and eigenvalues in metric multidimensional scaling // *Psychometrika*. – 1978, Vol. 43, №2.

2.47. Young F.W., Null C.H. Multidimensional scaling of nominal data: the recovery of metric information with ALSCAL // *Psychometrika*. – 1978, Vol. 43, №3.

2.48. Красскэл Дж. В. Взаимосвязь между многомерным шкалированием и кластер-анализом // *Классификация и кластер*. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – С. 21–41.

2.49. Терехина А.Ю. Анализ данных методами многомерного шкалирования. – М.: Наука, 1986.– 168 с.

2.50. Многомерное шкалирование и другие методы поиска структуры Статистические методы для ЭВМ / Пер. с англ.; Под ред. Малютова. – М.: Наука, 1986. – С. 301–347.

2.51. Дэвинсон М. Многомерное шкалирование: методы наглядного представления данных. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 254 с.

РОЗДІЛ 3

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА

Сучасне приладо- та машинобудівне виробництво є різносерійним і багатомоделюваним, 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 [3.1 – 3.13]. Поняття „класифікація” тісно пов'язане з такими термінами як угруповання, 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 багатовимірної статистичної аналізу: методами розпізнавання образів „з вчителем” (дискримінантний аналіз) і „без вчителя” (автоматична класифікація або кластерний аналіз).

В розділі розглядаються питання класифікації та розпізнавання образів методами кластерного та дискримінантного аналізу. Розроблено алгоритми та програми класифікації та розпізнавання образів на основі використання найбільш ефективних методів групування та класифікації. Наведено 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 розділі надано опис методу прискореної класифікації без втрати точності на основі використання методів факторного та компонентного аналізу.

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

В даному розділі 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.

3.1. Кластерний аналіз технологічної інформації

Методи автоматичної класифікації застосовуються в тих випадках, коли відсутні так звані навчальні вибірки [3.14 – 3.37]. 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 шкалюванням.

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.

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 [3.7, 3.8, 3.16 – 3.22].

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 евклідову та „зважену” евклідову відстань й Хемінгову відстань. [3.15, 3.19, 3.20, 3.23].

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 [3.1 – 3.4, 3.21, 3.24].

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” груп та на основі потенційної функції [3.5 – 3.20].

Наведені в розділі 2 методи зниження розмірності початкового факторного простору (розділ 2) та методи ієрархічного кластерного аналізу доцільно застосовувати для класифікації та розпізнавання образів при розв'язанні різноманітних технологічних задач [3.26 – 3.38]. Покажемо це на прикладі розробки технології виготовлення деталі [3.31].

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

$$D_i = \{Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{il}\}, i=1, 2, \dots, m,$$

де Z_{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 заготовки 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) D_i , що виготовляються на конкретному підприємстві та описуваних l ознаками (властивостями), можна сформулювати k груп

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}, 1 \leq k \leq m \dots$$

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 кожен 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 заготовки, 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 кожен 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:

$$s_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}}, \quad (3.1)$$

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:

$$s_{ij} = \frac{k_{ij}}{n_{ij}}, \quad (3.2)$$

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

$$d_{ij} = \sqrt[b]{\sum_{n=1}^l W_{ijn} (x_{in} - x_{jn})^b}, \quad (3.3)$$

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 [3.23, 3.30, 3.31]:

$$d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^l W_{ijk} C_{ijk}}{\sum_{k=1}^{ka} W_{ijk}}, \quad (3.4)$$

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, $0 \leq C_{ijk} \leq 1$. 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

$$C_{ijk} = 1 - \frac{|x_{ik} - x_{jk}|}{R_k}, \quad (3.5)$$

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

R_k – діапазон зміни значень k -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 [3.26 – 3.38]. 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

$$A_i = \{O_i, B_i, T_{ij}\}, \quad (3.6)$$

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

B_i і T_{ij} – устаткування і технологічне оснащення, що застосовуються в i -тій операції.

В загальному випадку множина переходів визначається як

$$O_i = \{C_i, U_i, MU_i, BU_i, P_{ij}\}, \quad (3.7)$$

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_{ij} – режими виконання технологічного переходу, що обчислюються після параметричного налаштування 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.

Методика кластерного аналізу технологічної інформації формалізована та представлена у вигляді схем алгоритмів, які програмно реалізовано. Узагальнена схема алгоритму автоматичної класифікації показана на рис. 3.1.

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. 3.2. 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. 3.3. Наведені приклади показують ефективність використання автоматичної класифікації для встановлення матеріалів, що є найбільш подібні за сукупністю їх характеристик.

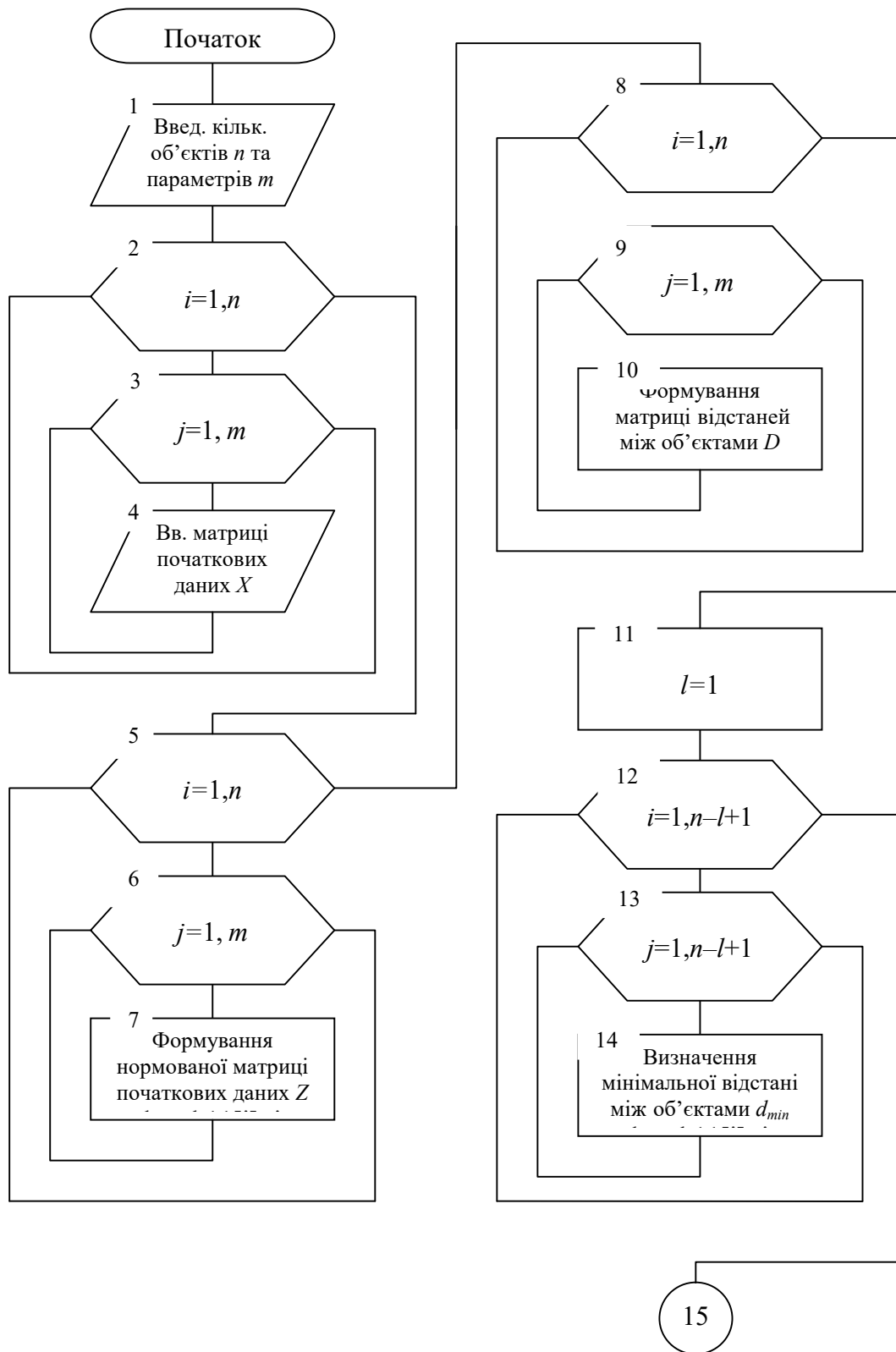
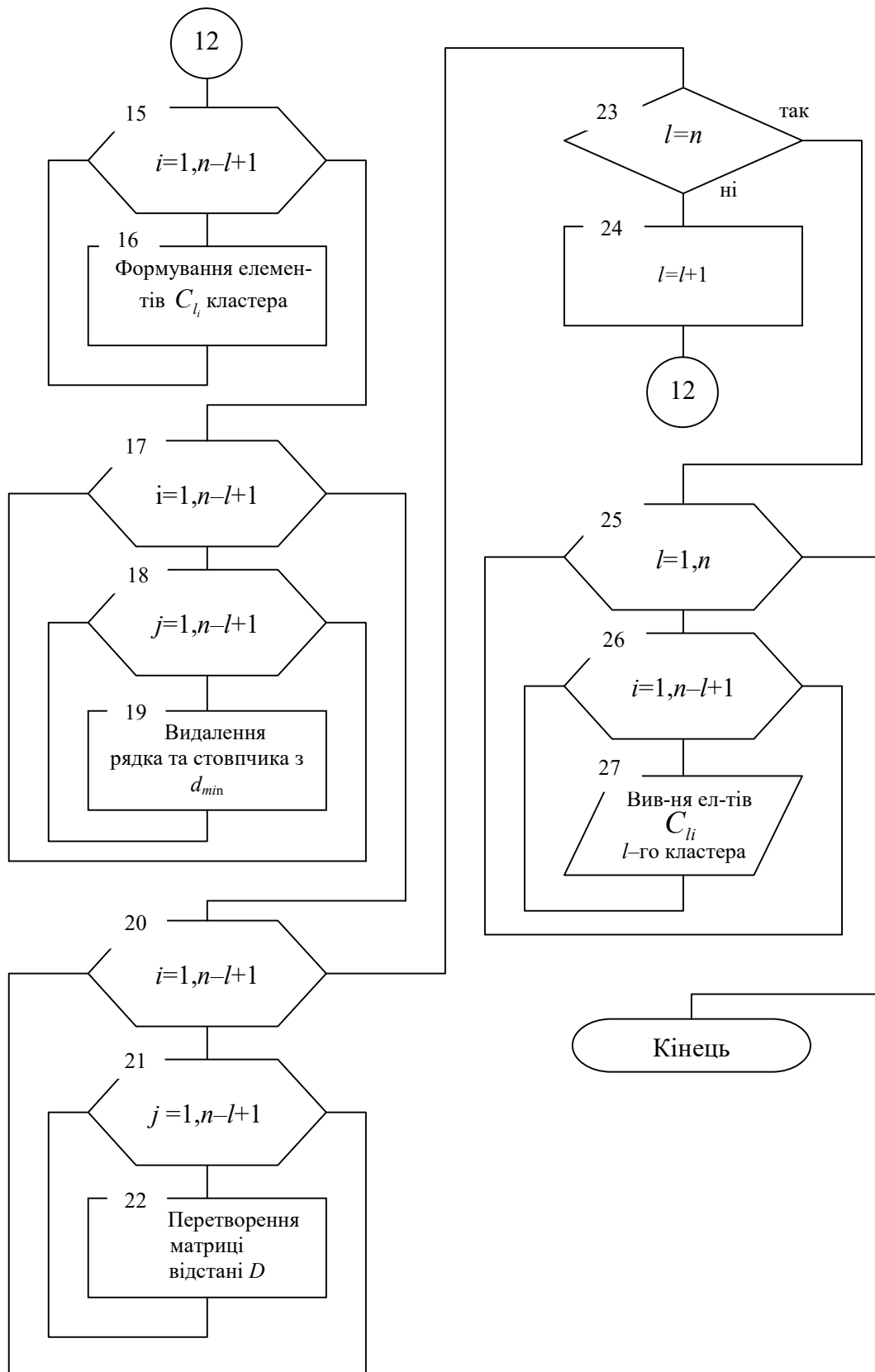


Рис. 3.1. Узагальнена схема алгоритму кластерного аналізу даних методом автоматичної класифікації.



Продовження рис. 3.1.

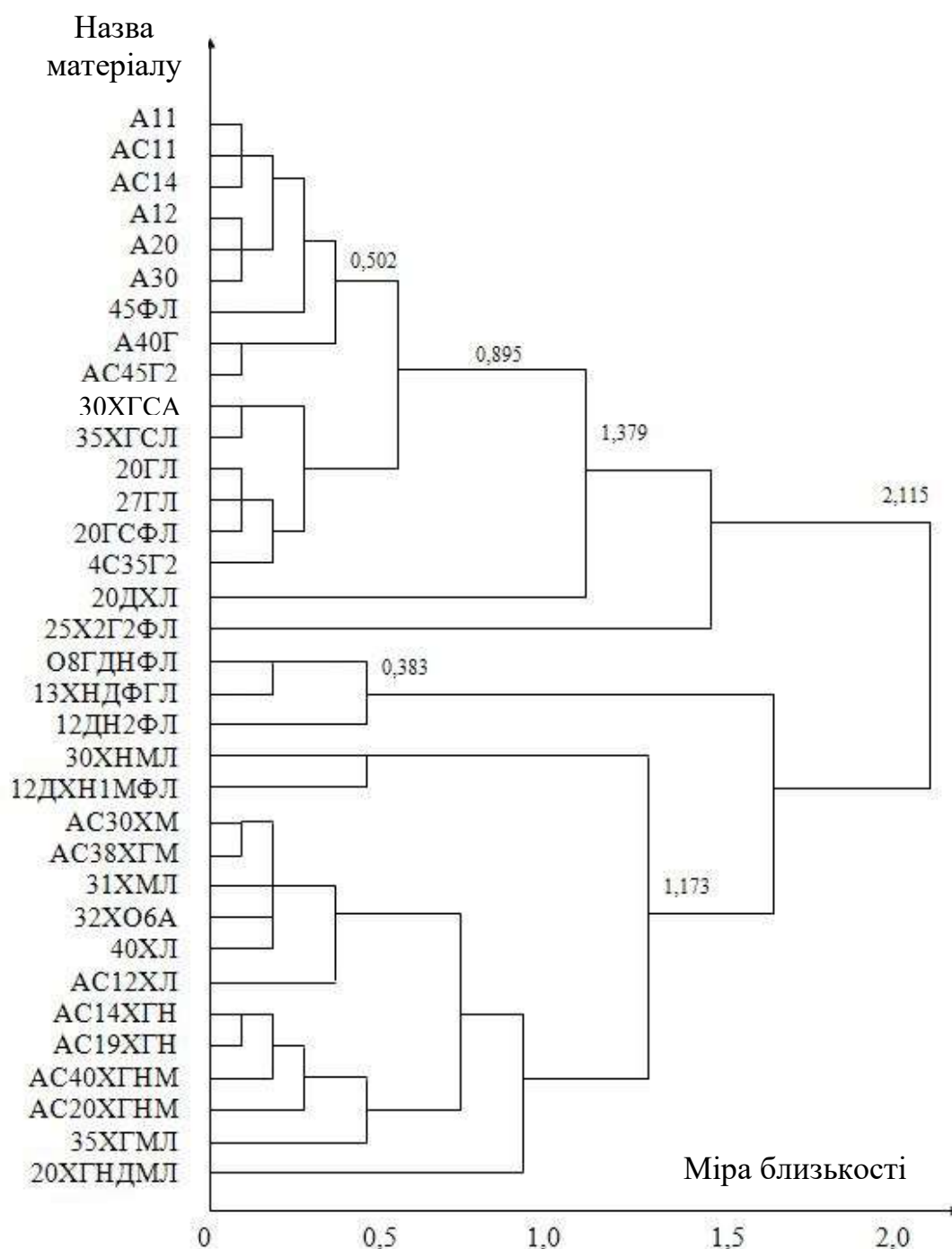


Рис. 3.2. Дендограма поєднання автоматних та інструментальних сталей в однорідні групи.

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 $\bar{X}^{(v)} = (\bar{X}^{(v)}(1), \dots, \bar{X}^{(v)}(k))$ (v – номер ітерації, $v = 0, 1, 2, \dots$) з відповідним перерахунком приписуваних ним „ваг”.

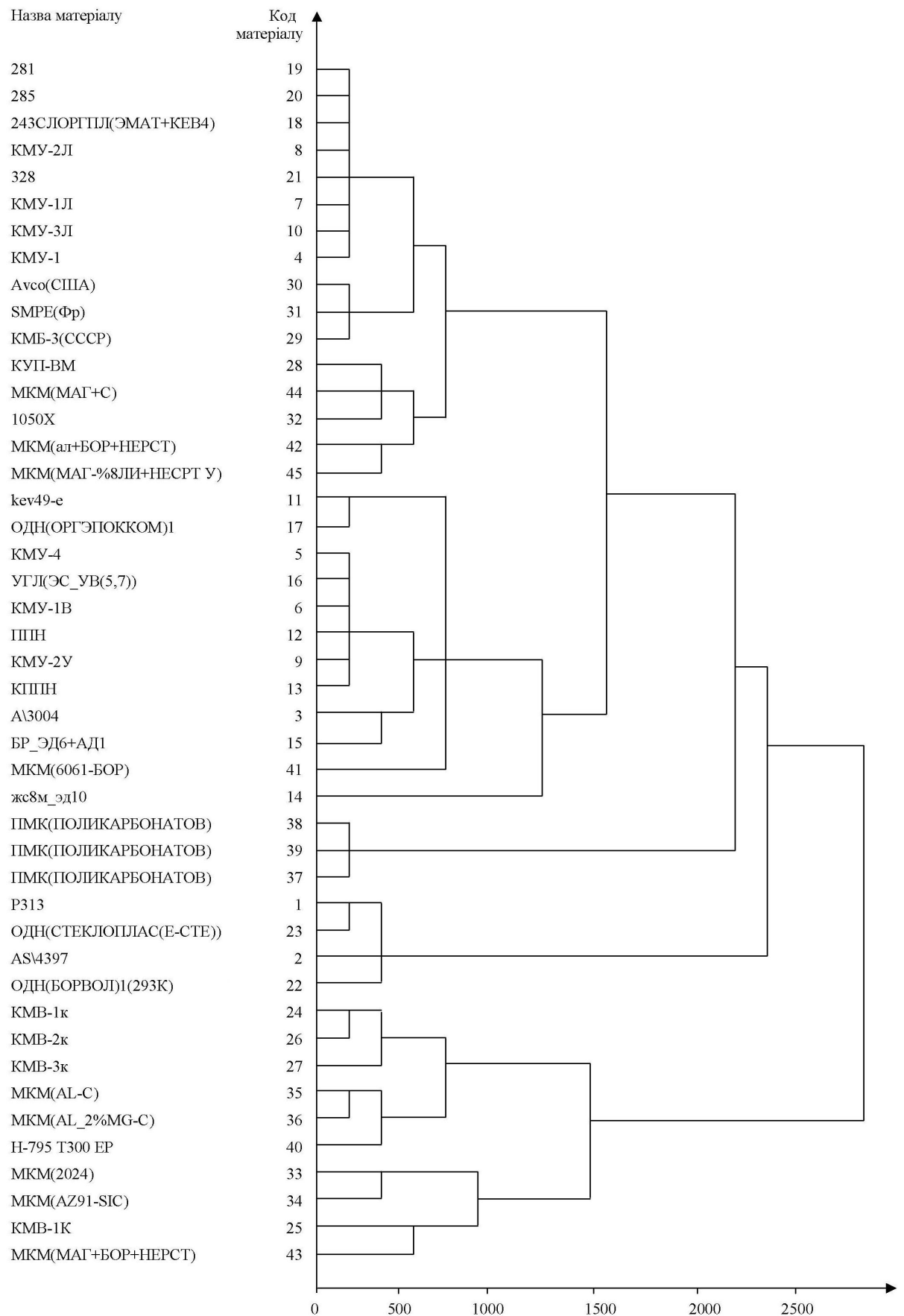


Рис. 3.3. Дендограма поєднання композиційних матеріалів в однорідні групи.

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 [3.15, 3.39, 3.40]. Поняття однорідності класів формалізується в даному методі за допомогою критерію якості розбиття виду

$$Q(S) = \sum_{j=1}^k \sum_{X_i \in S^{(j)}} d^2(X_i; \bar{X}(j)) \quad (3.8)$$

де $S = (S^{(1)}, S^{(2)}, \dots, S^{(k)})$ визначає конкретне розбиття об’єктів на k класів; $S^{(j)}$ – підмножина спостережень, що містять тільки ті спостереження, які віднесені до j -го класу; $\bar{X}(j) = \frac{1}{n_j} \sum_{X_i \in S^{(j)}} X_i$ – „центр тяжіння” j -го класу; n_j – кількість елементів в j - класі, а $d^2(X_i; \bar{X}(j))$ – квадрат евклідової відстані від об’єкта X_i до центру тяжіння $\bar{X}(j)$. Таким чином, (3.8) 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 $\bar{X}^{(0)}(i)$ 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) $\bar{X}^{(v)}$ до деякої межі при $v \rightarrow \infty$.

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 $\bar{X}^{(0)}$ різні комбінації з k точок досліджуваної сукупності і вибираючи для подальшого фінальний еталон $\bar{X}^{(n-k)}$, 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 $d(X_i, \bar{X}(j_0)) = \min_{1 \leq j \leq k} d(X_i, \bar{X}(j))$.

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, що представлено на рис. 3.4. 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 2.5 розділу 2. В результаті швидкої класифікації вказаних об'єктів отримано 3 кластери, координати центрів яких показано в таблиці 3.1, значення відстаней кожного матеріалу до центру відповідного кластера наведено в таблиці 3.2, а відстань між центрами визначених кластерів – в таблиці 3.3.

Таблиця 3.1

Координати центрів отриманих кластерів

№ кластера	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>
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 3.1

№ кластера	<i>Зерн.</i>	<i>HV</i>	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 3.2

Значення відстаней між 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 характеризується 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 однакові методи, умови та режими при обробці матеріалів однієї групи.

Таблиця 3.3.

Значення відстаней конкретної деталі 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

Продовження таблиці 3.3.

№ 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.

3.2 Дискримінантний аналіз технологічної інформації

Дискримінантний аналіз є статистичним методом, що дозволяє вивчати розходження між двома і більше групами об'єктів по декількох змінних одночасно[3.15, 3.23, 3.41 – 3.44]. 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.

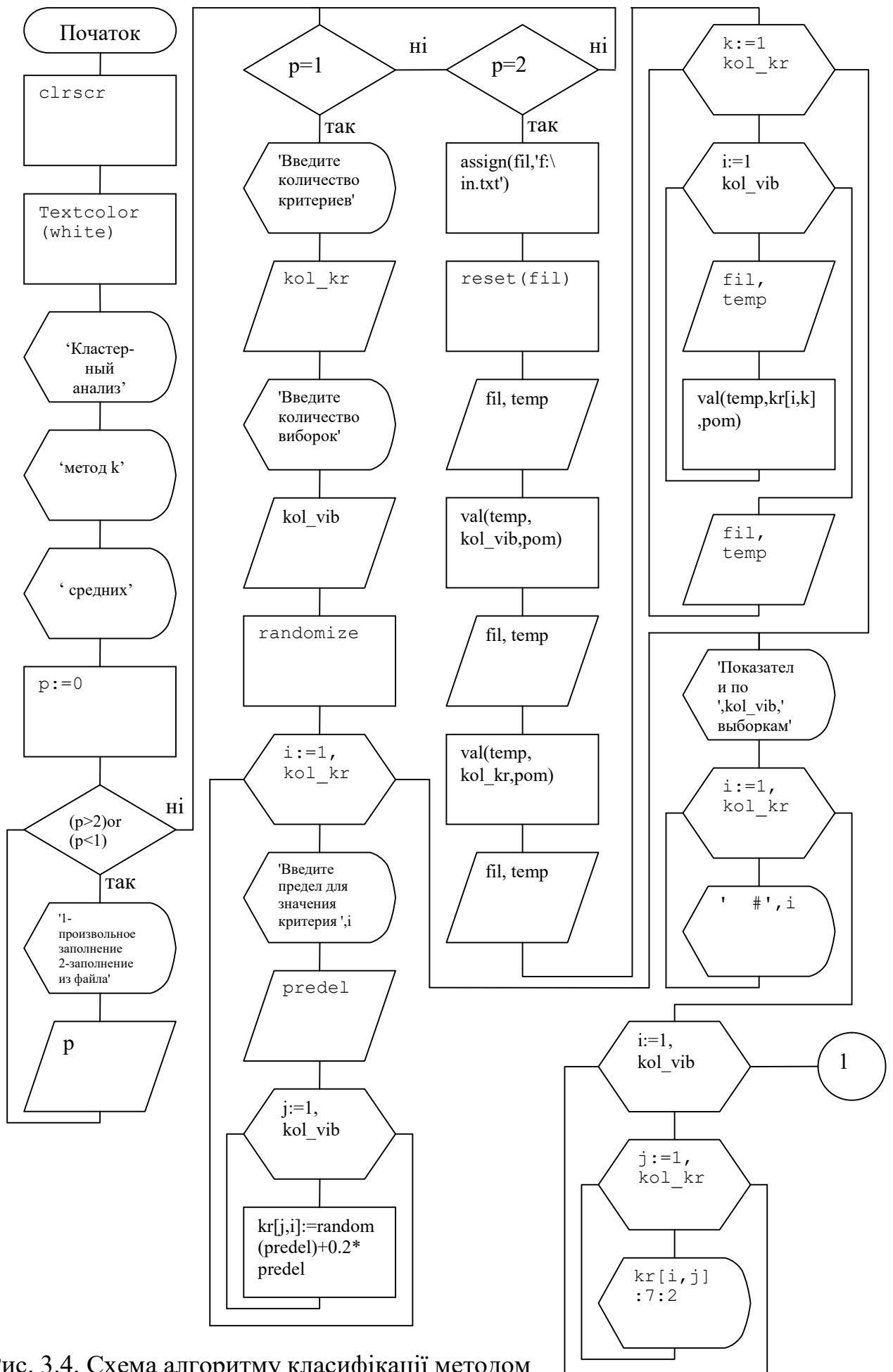
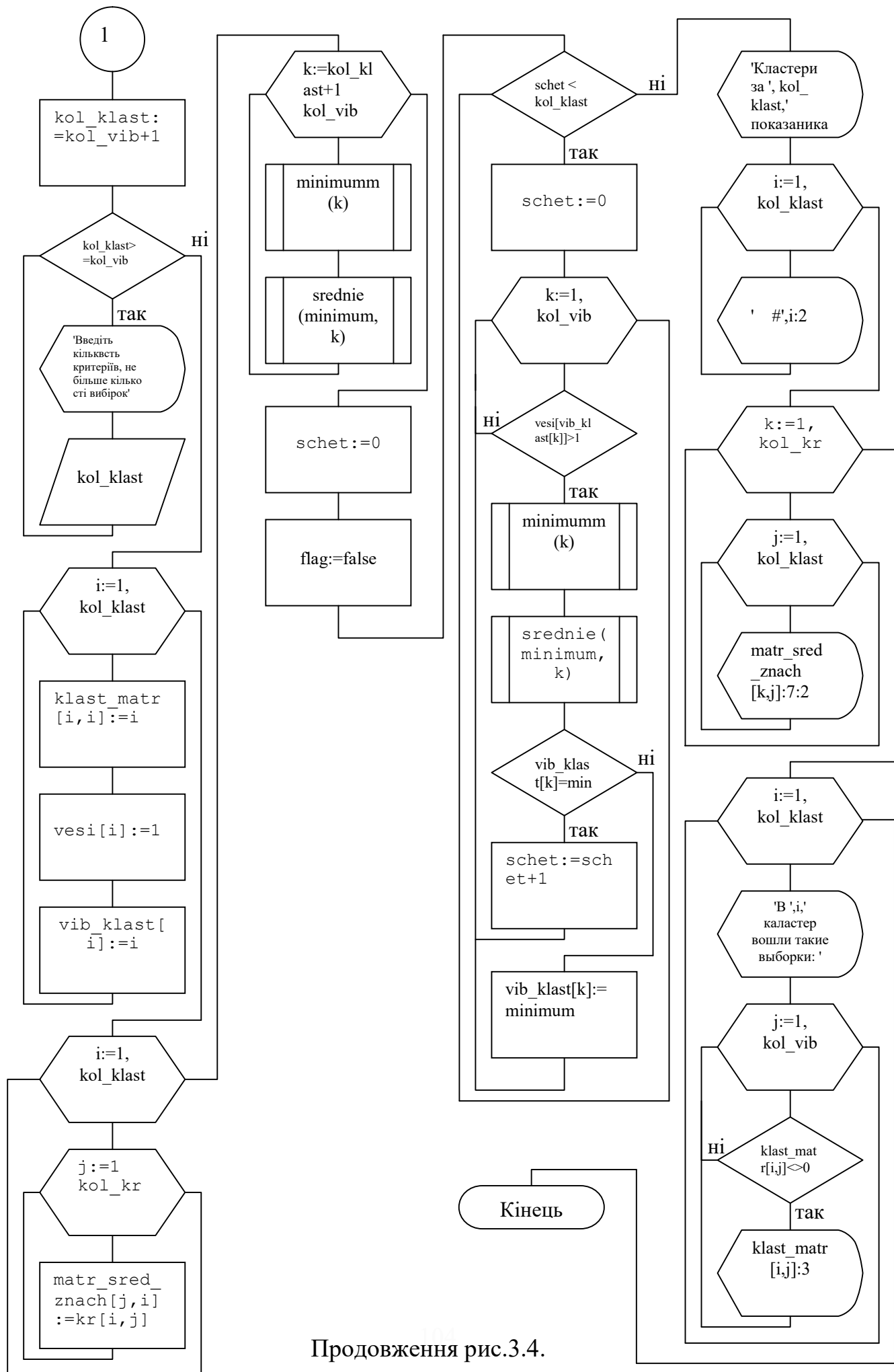


Рис. 3.4. Схема алгоритму класифікації методом k- середніх.



Продовження рис.3.4.

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 міжгрупових 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 відрізнити 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 використовуваний 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); багатовимірною нормальністю закону розподілу дискримінантних змінних для кожного класу.

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

$$f_{km} = u_1 x_{1km} + u_2 x_{2km} + \dots + u_p x_{pkm}, \quad (3.9)$$

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 виконується на основі інформації, яка міститься в дискримінантних змінних, використовується класифікаційна функція. Вона має такий вигляд:

$$h_k = b_{k0} + b_{k1} x_1 + b_{k2} x_2 + \dots + b_{kp} x_p, \quad k=1, \dots, g, \quad (3.10)$$

де h_k – значення функції для класу k ;

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

Представлену в [3.15, 3.23] методику дискримінантного аналізу реалізовано у вигляді узагальненого алгоритму та алгоритму використання класифікаційних функцій для розв'язання задачі розпізнавання образів, які наведено на рисунках 3.5 і 3.6, та розроблено відповідні програми.

3.3. 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

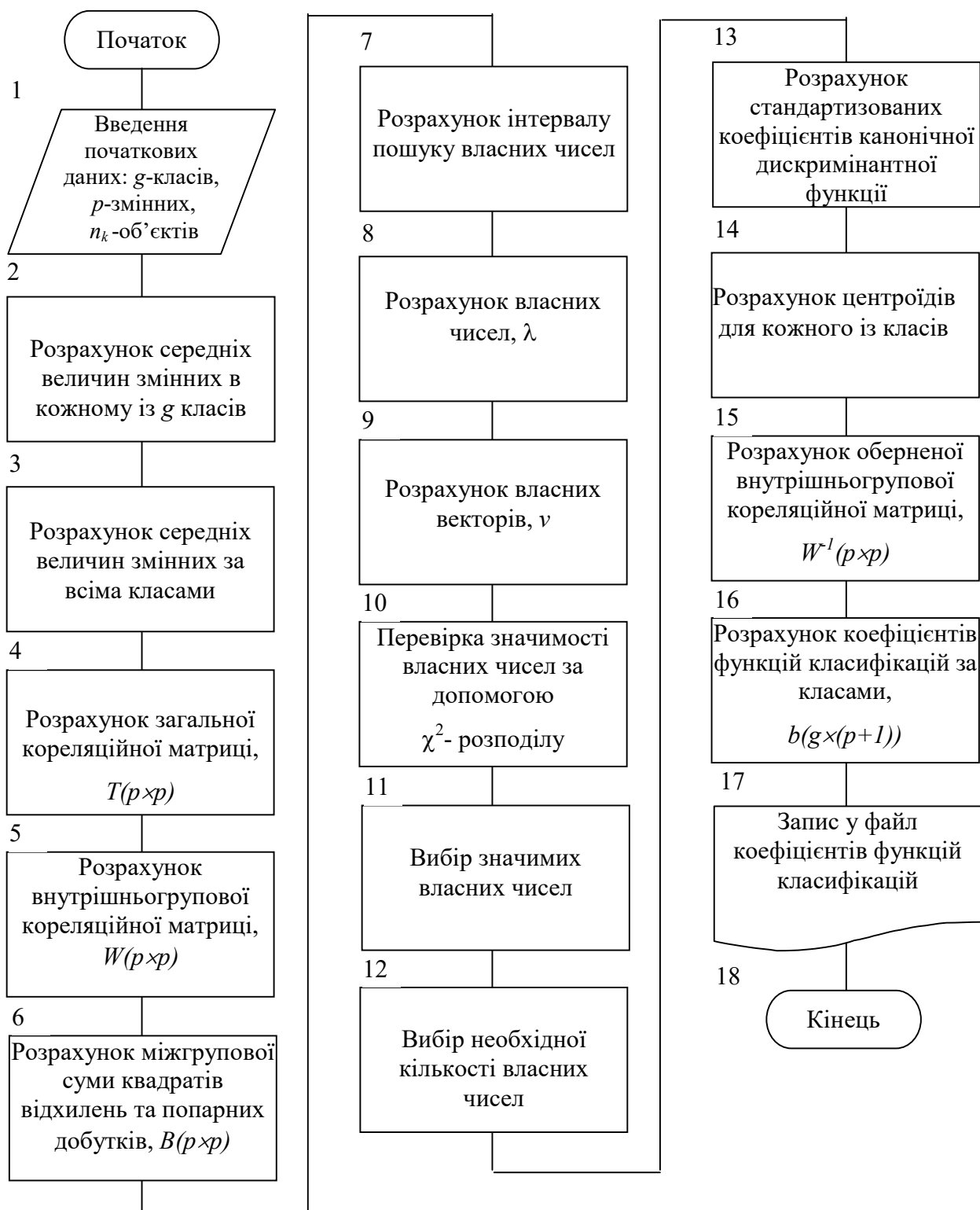


Рис. 3.5. Узагальнена схема алгоритму дискримінантного аналізу даних.

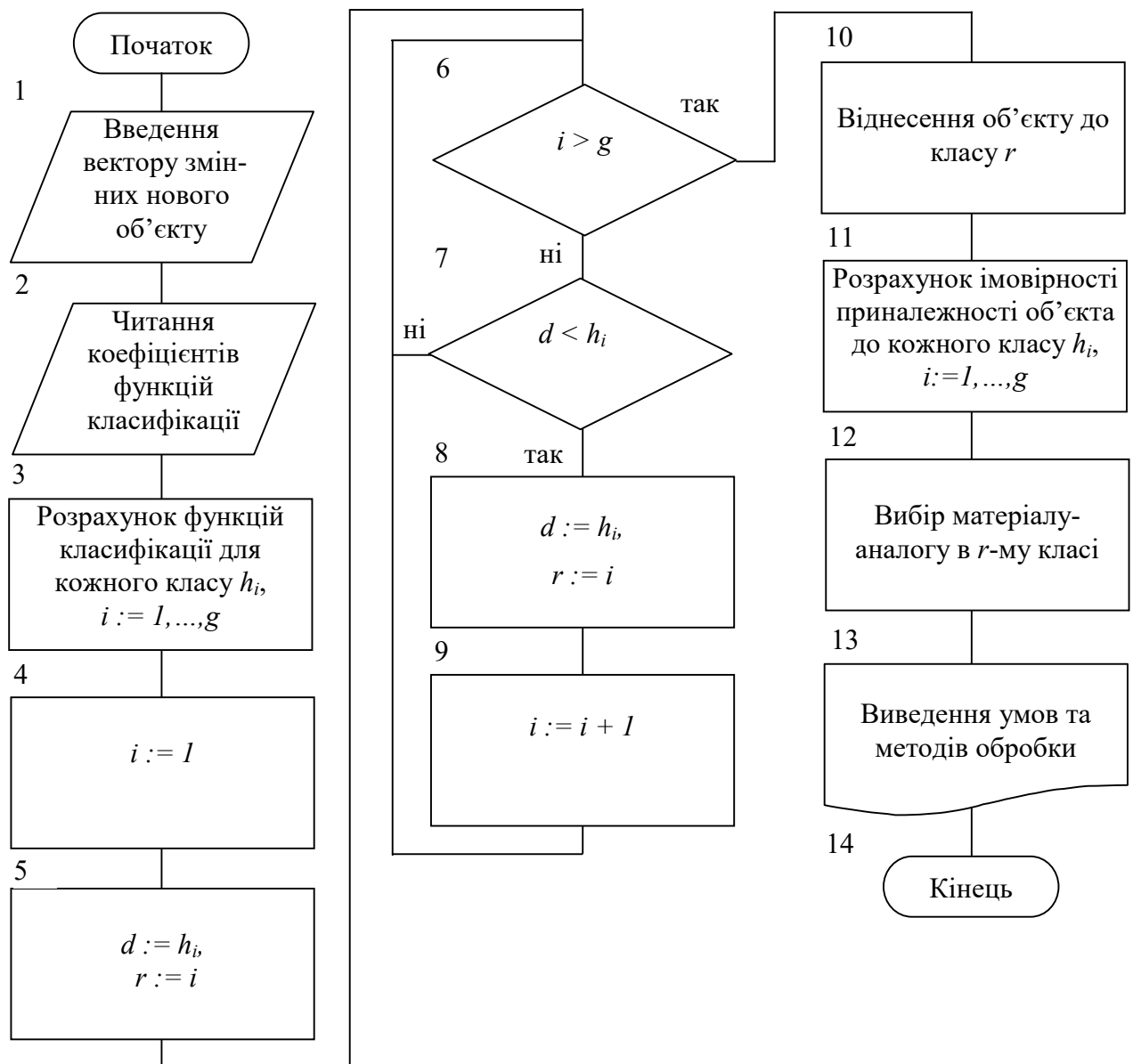


Рис. 3.6. Схема алгоритму використання класифікаційних функцій для розв'язання задачі розпізнавання образів.

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 короточасних експериментів. Схему алгоритму, що реалізує вказані дії, наведено на рис. 3.6. 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 [3.42, 3.44].

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:

$$h_1 = -37250.2 - 348.9 \cdot x_1 - 85562.9 \cdot x_2 + 2057.1 \cdot x_3 - 1121.1 \cdot x_4 - 1165.5 \cdot x_5 - \\ - 3744.1 \cdot x_6 - 83962.5 \cdot x_7 + 16770.6 \cdot x_8 + 57.1 \cdot x_9 + 878.1 \cdot x_{10} \quad (3.11)$$

$$h_2 = -34454.7 - 98.1 \cdot x_1 - 82145.1 \cdot x_2 + 1972.4 \cdot x_3 - 645.1 \cdot x_4 - 1155.1 \cdot x_5 - \\ - 3341.4 \cdot x_6 - 80631.3 \cdot x_7 + 16113.3 \cdot x_8 + 330.8 \cdot x_9 + 1245.8 \cdot x_{10} \quad (3.12)$$

$$h_3 = -41721.4 - 164.1 \cdot x_1 - 89548.9 \cdot x_2 + 1541.1 \cdot x_3 - 2721.5 \cdot x_4 - 1132.6 \cdot x_5 - \\ - 5781.5 \cdot x_6 - 87680.6 \cdot x_7 + 17240.7 \cdot x_8 + 34.3 \cdot x_9 + 1665.8 \cdot x_{10} \quad (3.13)$$

$$h_4 = -37210.2 + 77.2 \cdot x_1 + 84214.5 \cdot x_2 - 2830.8 \cdot x_3 - 478.7 \cdot x_4 + 424.9 \cdot x_5 + \\ + 2209.3 \cdot x_6 + 82234.9 \cdot x_7 - 16649.2 \cdot x_8 - 1204.8 \cdot x_9 - 1308.5 \cdot x_{10} \quad (3.14)$$

$$h_5 = -38288.0 - 640.4 \cdot x_1 - 86078.5 \cdot x_2 + 2330.4 \cdot x_3 - 340.7 \cdot x_4 - 1103.2 \cdot x_5 - \\ - 3017.1 \cdot x_6 - 84527.1 \cdot x_7 + 17015.9 \cdot x_8 + 1173.6 \cdot x_9 + 581.9 \cdot x_{10} \quad (3.15)$$

де x_1, \dots, x_{10} – дискримінанти 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 [3.44] 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 3.4.

Таблиця 3.4

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 3.5). З цієї таблиці видно, що даний матеріал належить до першого класу (леговані сталі). Імовірність приналежності досліджуваного матеріалу за класами дана в таблиці 3.6.

Із знайденого класу був визначений матеріал з найбільш близькими властивостями – це сталь марки 12ХН3А. Властивості досліджуваного матеріалу та матеріалу-аналогу представлені у таблиці 3.7. 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 багатфакторного статистичного аналізу дає позитивні результати. Це дозволяє при виробничій необхідності замінити один матеріал іншим без погіршення експлуатаційних характеристик деталі, що виготовляється з нього.

Таблиця 3.5

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 3.6

Імовірності приналежності досліджуваного матеріалу

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

Таблиця 3.7

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:

$$f_{km} = u_1 x_{1km} + u_2 x_{2rm} + \dots + u_p x_{pkm}, \quad (3.16)$$

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:

$$h_k = b_{k0} + b_{k1}x_1 + b_{k2}x_2 + \dots + b_{kp}x_p, \quad k=1, \dots, g, \quad (3.17)$$

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 3.8, а значення коефіцієнтів класифікаційних функцій – в таблиці 3.9. В якості параметрів дискримінації та класифікації використано такі характеристики вуглецевих сталей як вуглець C , марганець Mn , кремній Si ; 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 .

Таблиця 3.8

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 3.10 та 3.11. 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 .

В таблицях Б.1, Б.2, Б.3 і Б.4 Додатку Б наведено результати визначення коефіцієнтів класифікаційних функцій інструментальних сталей (високолегованих, не теплостійких, високої твердості та напівтеплостійких високої твердості), інструментальних матеріалів (теплостійких і швидкорізальних сталей та твердих сплавів), корозійностійких матеріалів (пружинних, корозійностійких сталей і сплавів, високоміцних хромонікелевих сталей аустенітно-мартенситного класів, корозійностійких сталей феритно-аустенітного класів) та сплавів на основі міді та нікелю (мідно-нікелеві сплави, нікель та його сплави та жароміцні мідні сплави)

Таблиця 3.9

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	ReH	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

**Значення дискримінантних змінних для легованих
конструкційних сталей**

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

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.

Таблиця 3.11

Значення коефіцієнтів класифікаційних функцій для легованих конструкційних сталей

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

3.4. Класифікація шляхом зниження розмірності

Статистичні методи зниження розмірності початкового простору параметрів з подальшим його відновленням і використанням методик, що викладені в розділі 2, дозволяють розробити алгоритм класифікації без втрати точності поділу об'єктів на класи, які є близькими по сукупності значень параметрів [3.38, 3.45].

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

$$S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_\ell\} \quad (3.18)$$

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

$$S_j = (x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, \dots, x_{nj}), j = 1, 2, \dots, \ell \quad (3.19)$$

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

$$R(i, j) = \varphi(S_i, S_j) = \varphi((x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}), (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj})) \dots \quad (3.20)$$

В якості такої міри може бути обрана відстань по Хеммінгу, Евклідова відстань, відстань Махаланобіса тощо [3.20, 3.34, 3.41, 3.45]. Після введення граничної оцінки близькості на множині S всіх пар об'єктів, визначається функція близькості згідно з порогом b як

$$\Gamma(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } R(i, j) > b, \\ 1, & \text{якщо } R(i, j) \leq b \end{cases} \quad (3.21)$$

Обчисливши значення $\Gamma(i, j)$ при $i, j = 1, 2, \dots, \ell, i \neq j$, 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 [3.20].

Перехід з вихідного ℓ - вимірного ознакового простору в m – вимірний факторний (при $m \ll \ell$) варто виконувати в три етапи відповідно до принципів класичного факторного аналізу [3.20, 3.23, 3.27, 3.28, 3.41].

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

$$x_{ij} = a_{i1}f_{1j} + a_{i2}f_{2j} + a_{i3}f_{3j} + \dots + a_{in}f_{nj}, \quad (3.22)$$

де a_{ip} – значення факторних навантажень при p – му факторі;
 f_{pj} – значення фактора F_p у i -го об'єкта; $j = 1, 2, \dots, \ell$; $i = 1, 2, \dots, n$...

Послідовність визначення факторних навантажень a_{ip} наведена в розділі 2.

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

$$r_{ik} = \frac{1}{e} \sum_{j=1}^e x_{ij}^H x_{kj}^H, \quad (3.23)$$

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

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

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

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m > \dots > \lambda_n. \quad (3.24)$$

За розмірність факторного простору приймається номер m останнього власного значення λ , 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

$$\frac{1}{e} \sum_{p=1}^m \lambda_p \geq 0,80. \quad (3.25)$$

Для перетворення вихідного ознакового простору у факторний необхідно кожному об'єкту, представленою значеннями ознак, з деяким ступенем точності скласти набір значень факторів. Для виразу (3.22) скористаємося методом повної оцінки з метою визначення f_{pj} , $p = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$... [3.23, 3.41, 3.45]. З множинного регресійного аналізу відомо, що рівняння регресії, яке зв'язує фактори й ознаки, має наступний вигляд

$$f_{pj} = \beta_{p1} \cdot x_{1j} + \beta_{p2} \cdot x_{2j} + \dots + \beta_{pn} \cdot x_{nj}, \quad (3.26)$$

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

$$\begin{aligned}
r_{11}\beta_{p1} + r_{12}\beta_{p2} + \dots + r_{1n}\beta_{pn} &= T_{1p} \\
r_{21}\beta_{p1} + r_{22}\beta_{p2} + \dots + r_{2p}\beta_{pn} &= T_{2p} \\
&\dots \\
r_{n1}\beta_{p1} + r_{n2}\beta_{p2} + \dots + r_{np}\beta_{pn} &= T_{np},
\end{aligned} \tag{3.27}$$

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

$$r_{xi, Fp} = a_{ip}, \quad i = 1, 2, \dots, n; p = 1, 2, \dots, m \dots \tag{3.28}$$

Розв'язавши систему лінійних рівнянь (3.27) з врахуванням (3.28), 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, \dots, V_m).. На наступному кроці обчислень усі фактори f_{pj} нормуються щодо їх максимальних значень згідно з індексом j

$$\begin{aligned}
f^*_{pj} &= \frac{f_{pj}}{\max(f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pl})}, \\
p &= 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, \ell.
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Надалі індекс $*$ для простоти запису будемо опускати.

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

$$W^f = (W_1^f, W_2^f, \dots, W_m^f), \tag{3.30}$$

де W_i^f – вага i - го фактора, $0 \leq W_i^f \leq 1, i = 1, 2, \dots, m \dots$

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

$$r_k^f(i, j) = W_k^f \varphi(f_{ki} - f_{kj}) \tag{3.31}$$

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

$$\xi^f = \xi^f(\xi_1^f, \xi_2^f, \dots, \xi_m^f), \quad 0 \leq \xi_i^f \leq 1, i = 1, 2, \dots, m \dots$$

як

$$r_k^f(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |f_{ki} - f_{kj}| > \xi_k^f, \\ W_k^f, & \text{якщо } |f_{ki} - f_{kj}| \leq \xi_k^f \end{cases} \quad (3.32)$$

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

$$R^f(i, j) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m r_k^f(i, j), \quad (3.33)$$

при $0 \leq R^f(i, j) \leq 1$.

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

$$\Gamma^f(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } R^f(i, j) < b^f, \\ 1, & \text{якщо } R^f(i, j) \geq b^f \end{cases} \quad (3.34)$$

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 ,

$$K^f = \{S_1^f, S_2^f, \dots, S_{n^f}^f\}, \quad n^f \leq n,$$

яку визначимо за формулою

$$R^f(i, K^f) = \frac{1}{n^f} \sum_{j \in K^f} \Gamma^f(i, j), \quad 0 \leq R^f(i, K^f) \leq 1 \quad (3.35)$$

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

$$\Gamma^f(i, K^f) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } R^f(i, K^f) < d^f, \\ 1, & \text{якщо } R^f(i, K^f) \geq d^f \end{cases} \quad (3.36)$$

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

Формування класифікаційних груп (підмножин K^f) здійснюється в два етапи. На першому етапі виконується попередня класифікація $K^f = \{K_1^f, K_2^f, \dots,$

$K_r^f\}$... 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 $F^f(i, K_1^f) = 1$. 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 $S_i^f \in S^f$ визначається

$$R^f(i, K_s^f) = \max \{R^f(i, K_1^f), R^f(i, K_2^f), \dots, R^f(i, K_r^f)\} \dots \quad (3.37)$$

Якщо $R^f(i, K_s^f) \geq b$, то стовпець S_i^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

$$A^f = \{K_1^f(U_1^f), K_2^f(U_2^f), \dots, K_e^f(U_e^f)\} \dots$$

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.

Узагальнена схема класифікації об'єктів шляхом стиснення факторного простору з використанням алгоритмів факторного та компонентного аналізу наведена на рис. 3.6.

3.5. Використання методів багатовимірної статистичного аналізу для визначення оброблюваності конструкційних матеріалів

Хімічний склад і фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, як і інструментального матеріалу, суттєвим чином впливає на умови їх використання, особливо при обробці матеріалів різанням. Так, в нормативах з режимів різання одні і ті ж нормативні значення швидкості різання і подачі рекомендуються для великої групи конструкційних матеріалів, які можуть відноситись до кількох класифікаційних груп (наприклад, до якісних конструкційних сталей і легованих сталей).

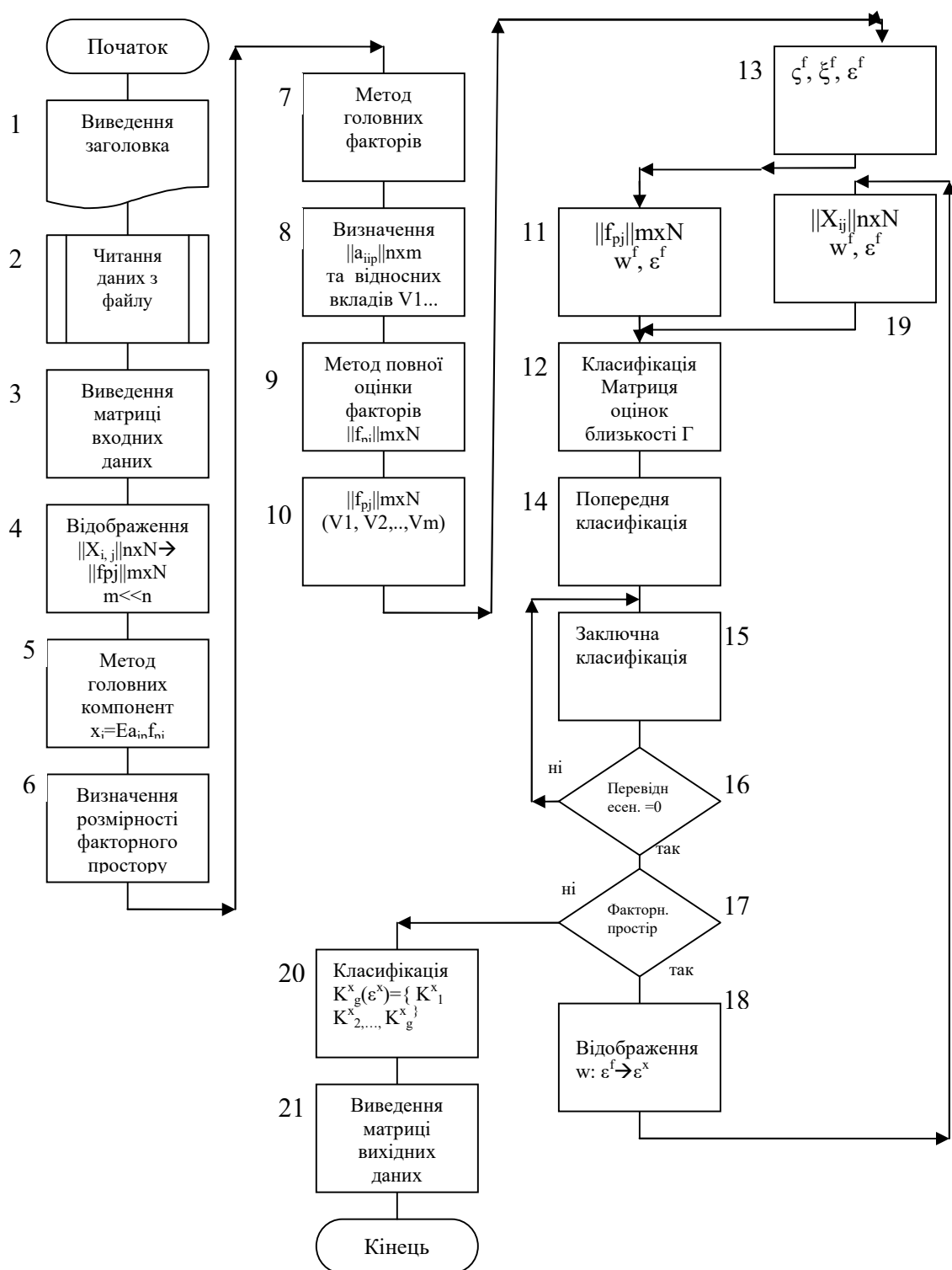


Рис. 3.6. Узагальнена схема алгоритму прискореної класифікації без втрати точності.

Тому важливим є врахування в режимах різання особливостей конкретного як оброблюваного, так і інструментального матеріалу. Це пропонується здійснювати за спеціальною методикою з використанням методів факторного, кластерного та дискримінантного аналізу, суть яких наведено в розділах 2 і 3, шляхом введення додаткових поправочних коефіцієнтів, що

враховують хімічний склад та фізико-механічні властивості оброблюваного та інструментального матеріалу.

Крім того, використання вказаних методів багатовимірного статистичного аналізу дозволяє визначити комплексну відносну оброблюваність конструкційного матеріалу в порівнянні з будь яким іншим матеріалом та реальну оброблюваність у вигляді рекомендованих режимів різання без проведення експериментальних досліджень.

3.5.1. Методика визначення оброблюваності конструкційних матеріалів методами багатовимірного статистичного аналізу

Зазвичай відносна оброблюваність конструкційного матеріалу, як і відносні оброблювальні властивості інструментального матеріалу, визначаються шляхом проведення експериментів над досліджуваним та еталонним матеріалами при визначених однакових умовах (наприклад з однаковою швидкістю різання). Такий метод встановлення оброблюваності потребує значних витрат часу, коштів та електроенергії на проведення досліджень.

Встановлення реальної оброблюваності різанням конструкційного матеріалу полягає в визначенні режимів (швидкості різання та подачі), які є близькими до оптимальних, враховуючи особливості конкретного матеріалу. В нашому випадку такими характерними особливостями є його хімічний склад та фізико-механічні властивості, що відрізняють даний матеріал від інших матеріалів даної групи.

Можливості сучасної обчислювальної техніки та новітні економіко-математичні методи в вигляді методів багатовимірного статистичного аналізу дозволяють по іншому підійти до розв'язання задачі визначення відносної та реальної оброблюваності. Для цього треба знати конкретні значення параметрів хімічного складу та фізико-механічних властивостей досліджуваного матеріалу. Дана інформація є початковою для запропонованої методики визначення його оброблюваності, узагальнений алгоритм якої наведено на рис. 3.7.

Згідно з запропонованою методикою всі конструкційні та інструментальні матеріали повинні бути попередньо поділені на класифікаційні групи за сукупністю фізико-механічних властивостей, хімічним складом та структурою. Для цього можна використати наявний в довідковій літературі класифікаційний поділ матеріалів на різноманітні групи (наприклад, вуглецеві, якісні вуглецеві, леговані, жаростійкі, жароміцні сталі тощо, алюміній та сплави на його основі, мідь і мідні сплави, чавуни, титан і титанові сплави тощо). Більш точний поділ оброблюваних і інструментальних сталей на класифікаційні групи можна отримати використовуючи методику кластерного аналізу, а саме – автоматичну класифікацію.

Для визначення класифікаційних груп матеріалів для кожної з них методами дискримінантного аналізу доцільно отримати класифікаційну функцію.

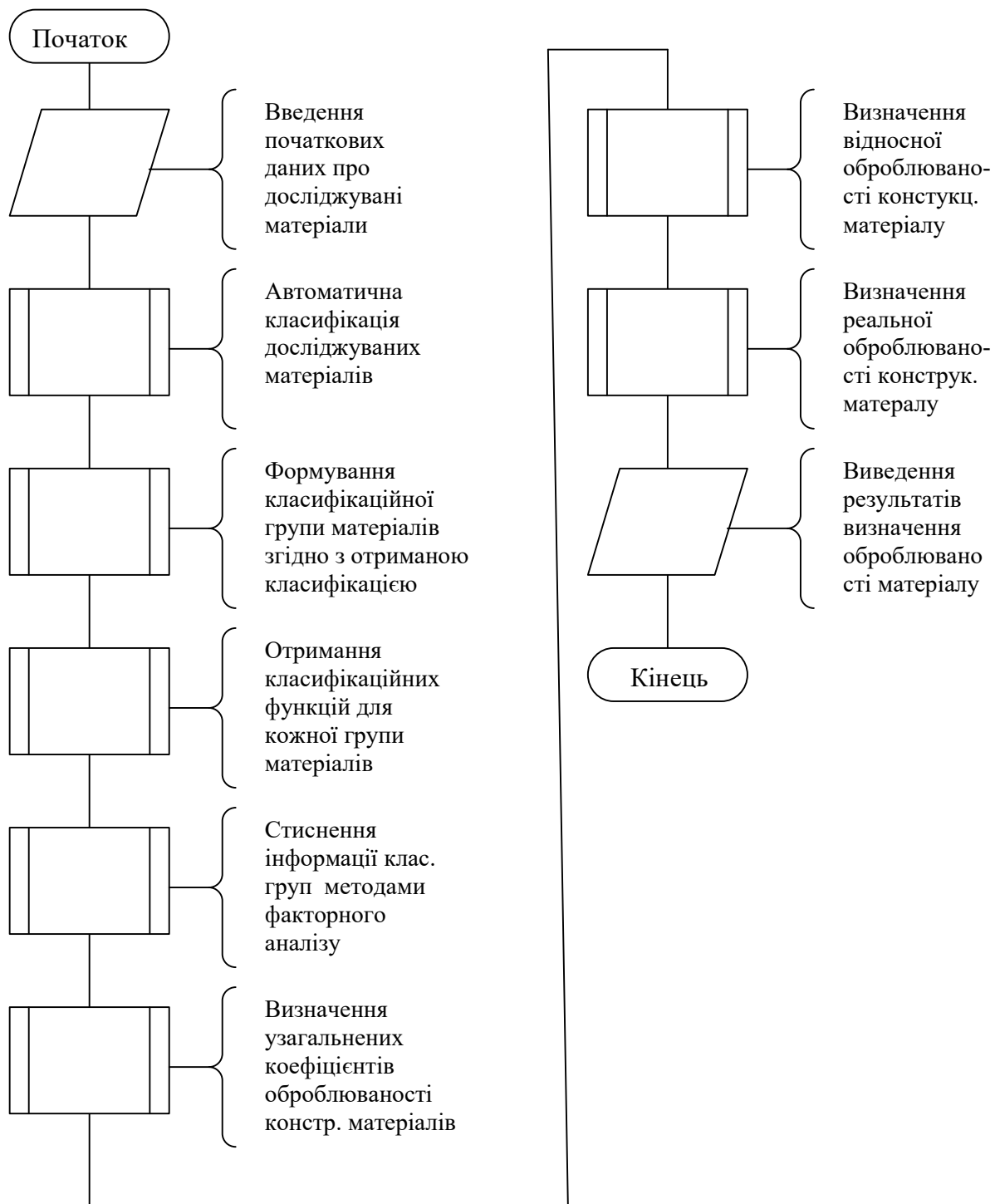


Рис.3.7. Узагальнена схема алгоритму визначення оброблюваності конструкційних матеріалів з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу.

Це можна виконати методами факторного або компонентного аналізу, основи яких наведено в розділі 2. Отримавши таким чином, невелику кількість латентних змінних (або головних компонентів) можна їх використати для визначення відносної та реальної оброблюваності будь якого конструкційного матеріалу.

На наступному етапі досліджень здійснюється визначення узагальнюючого коефіцієнта оброблюваності, що враховує особливості

досліджуваного матеріалу. При цьому в розрахунковій формулі кожна латентна змінна (головна компонента) задається з ваговим коефіцієнтом, що вказує на її вклад в загальну інформативність всіх змінних (компонент).

Алгоритм визначення цих коефіцієнтів оброблюваності для кожного конструкційного матеріалу наведено на рис. 3.8.

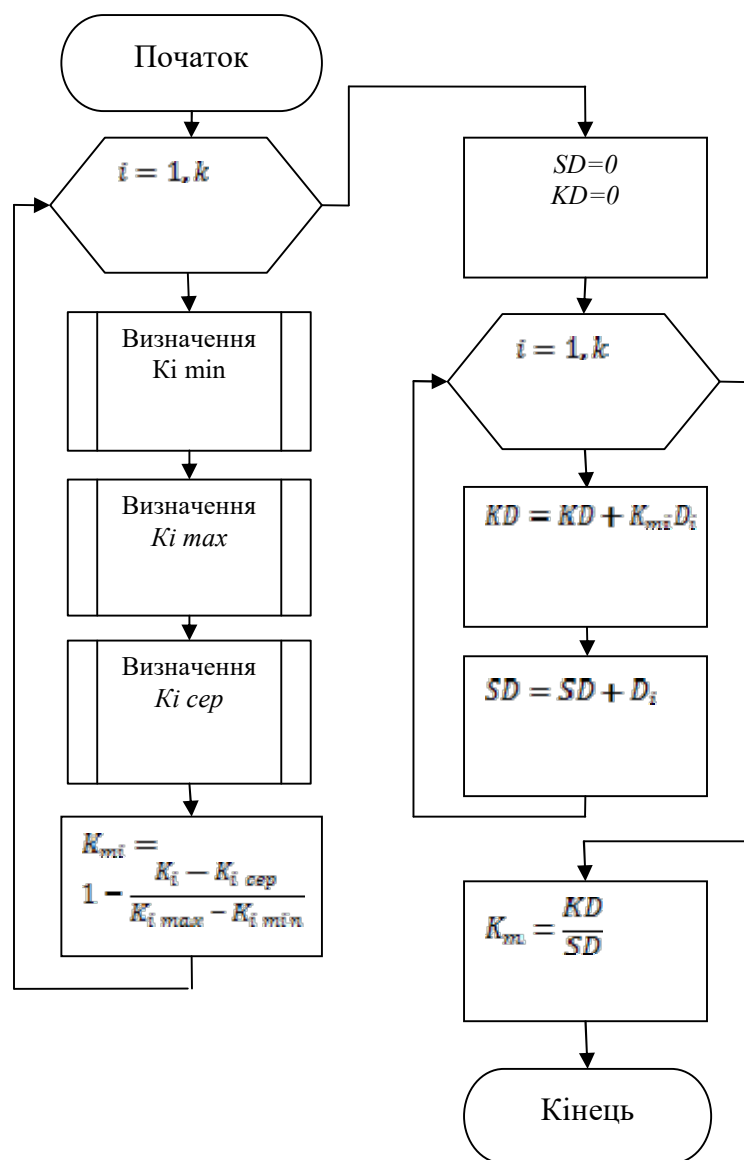


Рис. 3.8. Схема алгоритму визначення коефіцієнтів оброблюваності конструкційного матеріалу.

Згідно з цим алгоритмом для кожної латентної змінної досліджуваної групи матеріалів визначається найбільше $K_{i \max}$, найменше, $K_{i \min}$ та середнє $K_{i \text{сер}}$ її значення, а також відносний коефіцієнт відхилення від середнього. Далі, з врахуванням вкладу дисперсії кожної латентної змінної D_i в загальну дисперсію D , обчислюється узагальнюючий коефіцієнт оброблюваності K для досліджуваного конструкційного матеріалу.

Для визначення узагальненої відносної оброблюваності конструкційного матеріалу, як і оброблюваних властивостей інструментального матеріалу,

необхідно вказати еталонний матеріал, відносно якого вона визначається. Відношення узагальнюючих коефіцієнтів досліджуваного та еталонного матеріалу вказує на оброблюваність даного конструкційного матеріалу.

Алгоритм визначення відносної оброблюваності досліджуваного матеріалу наведено на рис. 3.9.

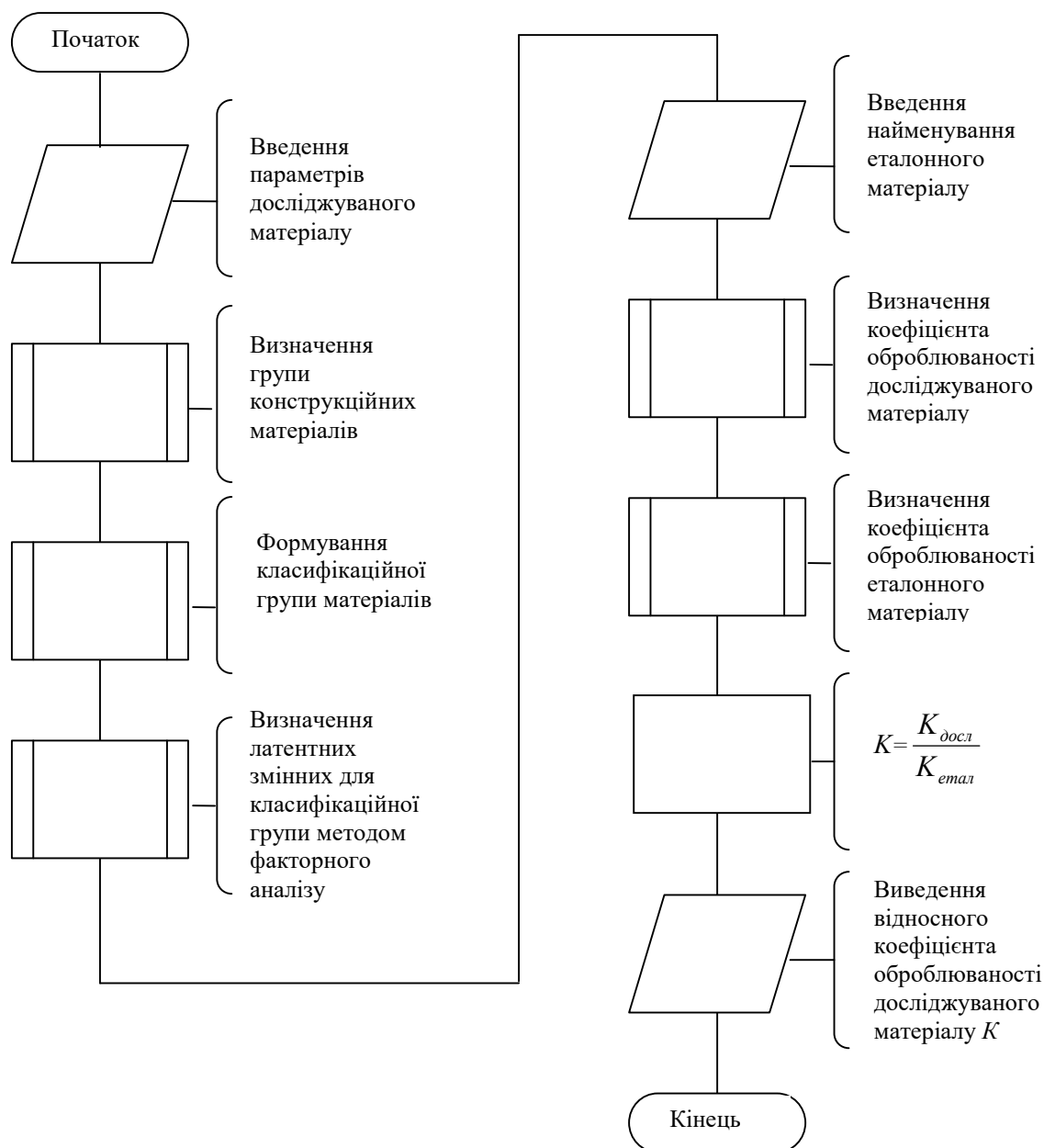


Рис.3.9. Схема алгоритму визначення відносної оброблюваності досліджуваного конструкційного матеріалу.

3.5.2. Визначення реальної оброблюваності конструкційного матеріалу

З метою встановлення реальної оброблюваності матеріалу, тобто рекомендованих режимів його обробки, необхідно визначити нові режими шляхом корегування рекомендованих нормативами режимів для даної

класифікаційної групи з використанням отриманого узагальнюючого коефіцієнта, що враховує параметри (хімічний склад та фізико-механічні характеристики) досліджуваного матеріалу.

Алгоритм вказаних дій наведено на рис. 3.10.

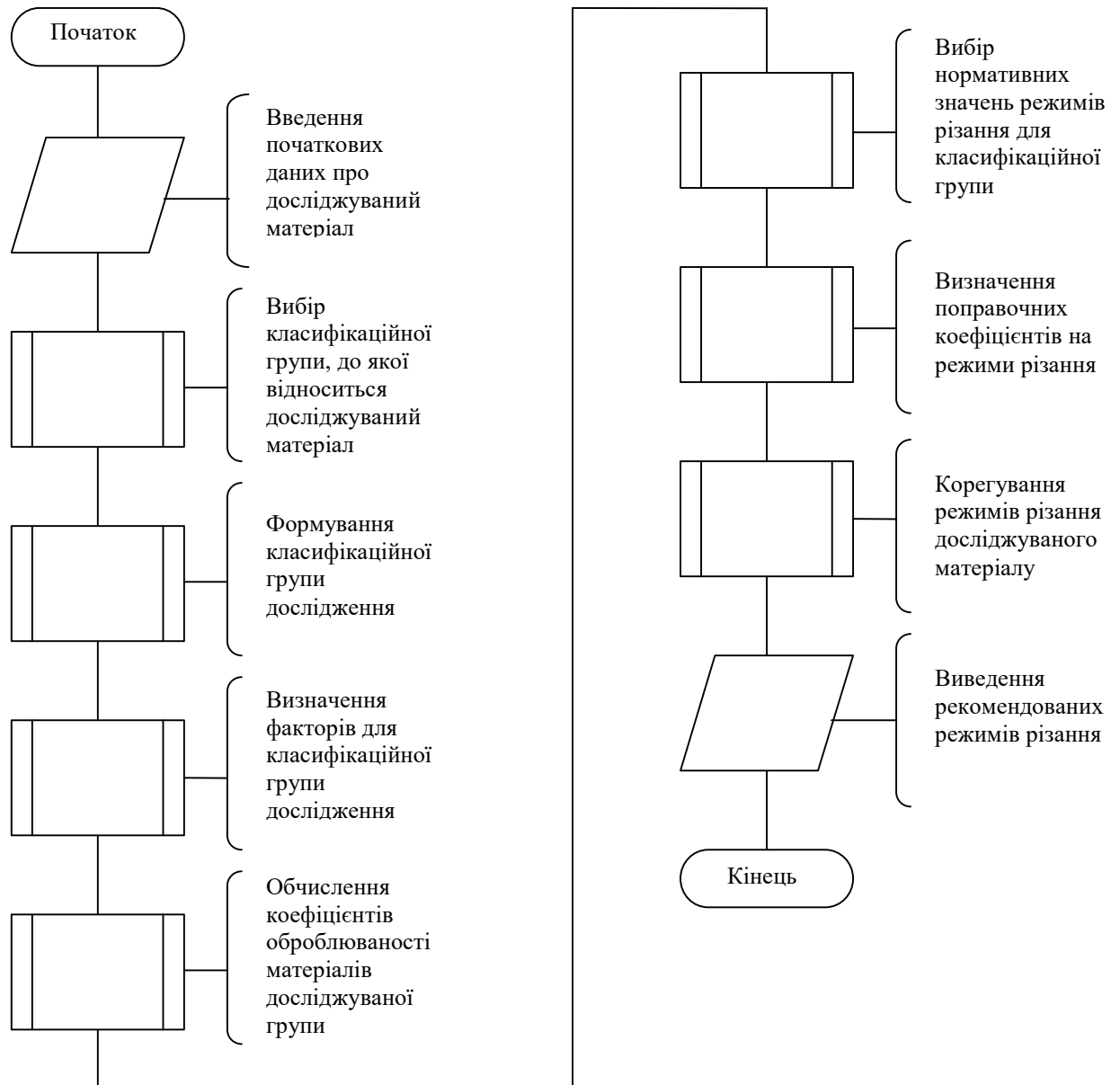


Рис. 3.10. Схема алгоритму визначення реальної оброблюваності досліджуваного матеріалу (раціональних режимів різання).

Згідно з першим етапом алгоритму визначення реальної оброблюваності вибирається класифікаційна група, до якої відноситься досліджуваний матеріал з параметрами, що наведені в таблиці 3.12.

Попередній аналіз характеристик цього матеріалу показав, що досить близькими до нього є якісні вуглецеві сталі, низьколеговані сталі та леговані сталі. До першої класифікаційної групи відносяться 19 найменувань матеріалів, до другої групи – 28 найменувань та до третьої – 85 найменувань.

Таблиця 3.12.

Хімічний склад та фізико-механічні характеристики досліджуваного матеріалу

C, %	Mn, %	Si, %	P, %	S, %	Cr, %	Ni, %	V, %	Ti, %	Mo, %	Al, %	C, %
0,46	1,64	0,32	0,03	0,031	0,28	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,46

Продовження таблиці 3.12.

R_{eH} , МПа	R_m , МПа	A, %	Z, %	KCU, кДж/м ²
400	680	11	40	390

Шляхом використання методики дискримінантного аналізу отримано класифікаційні функції для вказаних груп конструкційних матеріалів, які мають такий вигляд:

а) для якісних вуглецевих сталей

$$h_1 = -774,084 + 260,683C + 40,606Mn - 57,618Si + 207,008P + 22477,888S + 61,650Cr - 32,882Ni - 194,473Al - 213,310V - 10,080Ti + 8,058Mo - 1,940R_{eH} + 1,828R_m + 6,908A + 3,032Z - 0,891KCU;$$

б) для низьколегованих сталей

$$h_2 = -712,189 + 195,393C + 55,576Mn - 53,236Si - 398,857P + 27216,234S + 67,775Cr - 30,732Ni - 182,221Al - 169,554V + 15,320Ti + 6,879Mo - 1,374R_{eH} + 1,382R_m + 8,067A + 1,177Z - 0,786KCU;$$

в) для легованих сталей

$$h_3 = -650,326 + 232,805C + 47,881Mn - 49,273Si + 290,725P + 24023,654S + 59,694Cr - 27,883Ni - 169,179Al - 194,919V - 52,635Ti + 12,388Mo - 1,749R_{eH} + 1,801R_m + 5,840A + 3,566Z - 1,014KCU$$

В наведених формулах значення параметрів досліджуваного матеріалу задаються в нормалізованому вигляді.

Після обчислення класифікаційних функцій для вказаних груп матеріалів з врахуванням значень фізико-механічних характеристик та хімічного складу досліджуваного матеріалу, встановлено, що для даного матеріалу значення h_3 є найбільшим. Тому досліджуваний матеріал відноситься до третьої класифікаційної групи матеріалів (до легованих сталей).

Для стиснення масиву початкової інформації про характеристики конструкційних матеріалів та визначення латентних змінних використано незважений метод найменших квадратів факторного аналізу даних. В якості критерію вибору кількості латентних змінних, які з необхідною інформативністю характеризують матеріали даної групи вибрано шість компонент, власні значення яких кореляційної матриці початкових даних перевищують 1. Графік залежності власних значень відповідних векторів кореляційної матриці початкової інформації від номера латентної змінної (компоненти) наведено на рисунку 3.11.

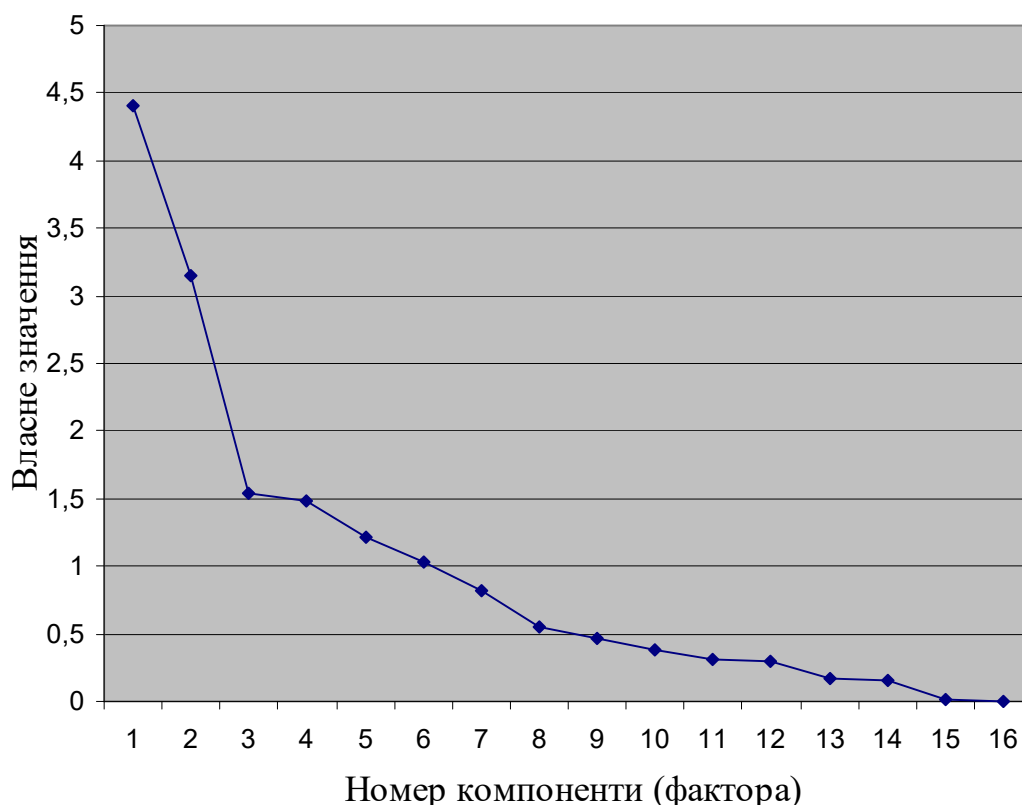


Рис. 3.11. Залежність номера латентної змінної (компоненти) від значення власного вектора кореляційної матриці початкових даних.

Із таблиці 3.13, де наведено значення власних векторів кореляційної матриці початкових даних та відповідної їм індивідуальної і накопиченої дисперсій, видно, що 6 латентних змінних враховують 80,22% інформації, яка міститься в матриці початкових даних.

В результаті стиснення масиву початкової інформації методами факторного аналізу отримано значення факторних навантажень на компоненти для класифікаційної групи легованих конструкційних сталей, що дозволяють визначити латентні фактори за значеннями характеристик будь якого матеріалу, які входять в дану класифікаційну групу. Ці коефіцієнти наведено в таблиці 3.14.

На основі використання наведених в таблиці 3.14 факторних навантажень отримано латентні змінні для кожного матеріалу даної класифікаційної групи, які наведено в таблиці 3.15.

Таблиця 3.13.

Значення власних векторів кореляційної матриці початкових даних та відповідні їм індивідуальні і накопичені дисперсії групи легованих сталей

№ компоненти	Величина власного значення кореляційної матриці	Дисперсія кожної компоненти	Накопичена дисперсія
1	4,403	27,518	27,518
2	3,145	19,655	47,173
3	1,546	9,663	56,836
4	1,490	9,311	66,147
5	1,218	7,613	73,760
6	1,034	6,461	80,220

Згідно з алгоритмом, що наведений на рис.3.8, визначено коефіцієнти оброблюваності матеріалів даної групи, які враховують хімічний склад та фізико-механічні властивості матеріалів. Значення визначених коефіцієнтів оброблюваності для групи легованих сталей наведено в таблиці 3.16.

Таблиця 3.14.

Значення факторних навантажень на компоненти для класифікаційної групи легованих конструкційних сталей

Найменування параметру	Фактори					
	1	2	3	4	5	6
<i>C</i>	-0,040	-0,173	-0,101	0,372	-0,074	0,239
<i>Mn</i>	-0,148	-0,091	-0,098	-0,211	-0,137	0,103
<i>Si</i>	0,016	-0,144	-0,065	-0,061	0,457	-0,538
<i>P</i>	0,176	0,038	-0,343	-0,135	0,073	0,111
<i>S</i>	0,176	0,038	-0,343	-0,135	0,073	0,111
<i>Cr</i>	0,151	-0,052	0,324	0,152	0,211	-0,138
<i>V</i>	0,073	0,036	0,014	0,314	-0,326	-0,076
<i>Ni</i>	0,160	0,101	-0,203	-0,081	-0,204	-0,047
<i>Al</i>	0,031	0,013	0,014	0,188	0,534	0,626
<i>Ti</i>	0,006	-0,046	0,336	-0,379	-0,150	0,357
<i>Mo</i>	0,101	0,103	0,075	0,330	-0,178	-0,032
<i>R_{eH}</i>	0,168	-0,175	0,166	-0,024	-0,067	-0,022
<i>R_m</i>	0,155	-0,197	0,140	-0,079	-0,060	-0,023
<i>A</i>	-0,127	0,196	-0,012	0,092	0,135	-0,142
<i>KCU</i>	0,070	0,260	0,168	-0,044	0,003	0,076
<i>Z</i>	0,058	0,232	0,217	-0,123	0,138	-0,104

Для визначення реальної оброблюваності (раціональних режимів різання) конструкційного матеріалу, що заданий своїми значеннями хімічного складу та фізико-механічними характеристиками достатньо режими різання, що надані в нормативах для даної класифікаційної групи відкоригувати за допомогою коефіцієнтів оброблюваності.

Так, для досліджуваного матеріалу, характеристики якого наведені в таблиці 3.12, треба в розрахункову формулу для визначення швидкості різання при точінні даного матеріалу [3.46] ввести узагальнюючий коефіцієнт оброблюваності, що враховує реальні характеристики оброблюваного матеріалу

$$V = \frac{C_v}{T^{0.25} t^{0.19} s^{0.24}} K_v K_{обр},$$

де C_v – коефіцієнт, значення якого для матеріалів групи легованих сталей є сталим;

K_v – коефіцієнт, що залежить від матеріалу різальної крайки інструмента, стану оброблюваної поверхні, від конструктивних форм, розмірів та способу кріплення деталі на верстаті;

$K_{обр}$ – коефіцієнт оброблюваності досліджуваного матеріалу, що визначений за запропонованою методикою, який дорівнює 1,15.

Таблиця 3.15.

Таблиця результатів стиснення початкової інформації про хімічний склад та фізико-механічні властивості легованих сталей

Найменування матеріалу	Латентні змінні (фактори)					
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6
1	2	3	4	5	6	7
15X	-0,75150	-0,46547	0,31626	-0,65866	0,55326	-0,68863
15XA	-0,74854	-0,48195	0,30289	-0,69666	0,57059	-0,71794
20X	-0,67130	0,06681	0,27537	-0,45683	0,25413	-0,46887
30X	-0,56272	0,16198	0,59416	-0,28258	0,21346	-0,29759
30XPA	0,29879	1,78193	0,81361	-0,48948	-0,25916	-0,29378
35X	-0,49673	0,40687	0,69152	-0,06067	0,03950	-0,05547
38XA	-0,39888	0,17702	0,93437	-0,20414	0,14198	-0,01709
40X	-0,45191	0,79202	0,68333	0,19833	-0,17856	0,12780
45X	-0,41888	1,15904	0,67270	0,46437	-0,39191	0,31223

Продовження таблиці 3.15.

1	2	3	4	5	6	7
50X	-1,96376	-1,77356	-0,25264	-0,17096	0,63782	-0,79670
15Г	-1,81008	-1,64238	-0,12016	-0,16859	0,53745	-0,57332
20Г	-1,66562	-1,50260	0,02239	-0,12525	0,42226	-0,32010
25Г	-1,61367	-1,09631	-0,01457	0,13094	0,18338	-0,09258
30Г	-1,64207	-0,79602	-0,08823	0,42733	-0,02333	0,14210
35Г	-1,57694	-0,39199	-0,07817	0,67967	-0,24954	0,32393
40Г	-1,53676	-0,00384	-0,11757	0,94290	-0,48371	0,55263
45Г	-1,49955	0,40079	-0,14359	1,24413	-0,73521	0,81062
50Г	-2,21695	-0,92117	-1,03795	-0,12174	0,07106	-0,48044
10Г2	-1,93924	0,16403	-0,97048	0,38371	-0,66985	0,46779
30Г2	-1,84542	0,39873	-0,93957	0,48174	-0,81736	0,66508
35Г2	-1,78641	0,59608	-0,87765	0,63301	-0,95149	0,84963
40Г2	-1,73329	0,78437	-0,81694	0,78780	-1,08327	1,03477
45Г2	-1,70909	0,94436	-0,72401	0,99231	-1,20403	1,20657
50Г2	-0,52045	0,19004	0,30649	-0,95737	0,24805	-0,40750
18ХГ	-0,23622	0,87967	0,56077	-3,07340	0,20476	0,93747
18ХГТ	-0,32178	0,38821	0,37679	-0,88294	0,11822	-0,27205
20ХГР	0,02648	1,44712	0,44909	-0,61727	-0,36081	-0,08763
27ХГР	0,07750	1,66366	0,70072	-2,93478	-0,10341	1,03381
25ХГТ	0,18104	2,07054	0,70681	-2,77160	-0,30797	1,15447
30ХГТ	-0,45876	0,96331	0,78493	-2,13446	-0,13427	1,54158
40ХГТР	-0,50338	0,18886	1,12719	0,17189	-0,86054	-0,02199
35ХГФ	0,05074	0,56068	1,14431	-0,64062	-0,39597	-0,29382
25ХГМ	-0,24999	0,70136	0,80334	0,42276	1,77131	-2,43863
33ХС	-0,21696	1,06837	0,79271	0,68880	1,55797	-2,25419
38ХС	0,00541	2,27239	0,60577	1,16218	1,33773	-2,57507
40ХС	-0,72643	-2,66648	1,90988	-0,57478	0,72448	-1,24053
15ХМ	-0,35160	-0,69546	1,17431	-0,53611	0,28187	-0,60950
20ХМ	-0,20883	-0,09304	1,26238	-0,18289	-0,04943	-0,31912
30ХМ	-0,19292	-0,30938	1,34911	-0,32934	0,07028	-0,39198
30ХМА	-0,20166	0,02174	1,39208	0,03426	-0,14544	-0,19017
35ХМ	-0,03999	0,30047	1,61172	0,21309	-0,24221	-0,21014
38ХМ	0,69788	-0,26598	3,23766	-0,10990	-0,09097	-0,99975
30Х3МФ	0,08067	-0,38324	2,44545	0,78329	-1,54641	-0,15196
40ХМФА	0,19597	-1,00817	-0,41073	0,15422	-0,11872	-0,17911
15ХФ	0,53144	-0,25990	0,22262	1,05557	-1,20909	0,76719
40ХФА	0,38791	-1,23381	-1,11397	-0,13027	-0,28521	-0,00471
15Н2М	0,46569	-0,97079	-1,01418	0,08460	-0,46388	0,23624
20Н2М	0,07822	-0,97463	-1,20308	-0,10706	0,40153	-0,05558
20ХН	0,27670	0,07726	-1,03415	0,61534	-0,27705	0,70739
40ХН	-1,96376	-1,77356	-0,25264	-0,17096	0,63782	-0,79670

Продовження таблиці 3.15.

1	2	3	4	5	6	7
45XH	0,36041	0,30731	-0,96110	0,75420	-0,42107	0,88973
50XH	0,34277	0,81129	-1,05540	1,14743	-0,70375	1,07626
20XHP	0,74867	-0,00179	-0,84968	-0,63012	0,26718	0,02046
12XH2	0,38457	-1,18373	-1,15477	-0,54347	0,56588	-0,30256
12XH3A	0,73932	-1,07198	-1,32672	-0,66624	0,26606	-0,32170
20XH3A	0,81056	-1,23755	-1,01944	-0,61263	0,28661	-0,13564
30XH3A	0,76811	-0,46779	-1,16036	0,04106	-0,16777	0,21167
12X2H4A	1,36142	-0,58894	-0,81013	-0,94622	0,42531	-0,65573
20X2H4A	1,51012	-0,01948	-0,74880	-0,66902	0,12866	-0,42395
20XГСА	-0,02751	0,22486	-1,51326	0,39914	1,37738	-1,47438
25XГСА	0,28456	0,99970	-1,46031	0,51394	1,03446	-1,27123
30XГC	0,18779	1,32052	-1,49221	0,97077	0,80917	-1,06297
30XГСА	0,21610	1,23555	-1,46375	0,86917	0,86117	-1,09332
35XГСА	0,90312	2,54842	-1,15881	0,93614	0,80952	-1,46038
30XГCH2A	1,11457	1,99334	-1,46515	0,29737	0,33343	-1,12461
15XГH2TA	0,51078	-0,36683	-1,14110	-2,88739	0,35209	1,25935
20XГHP	0,79323	0,19220	-0,94348	-0,70260	0,12065	0,09317
20XГHTP	0,48390	0,69283	-1,24428	-2,57458	-0,09253	1,69958
38XГH	0,04146	-0,48839	-0,94461	0,26592	-0,00270	0,77311
14X2H3MA	1,34956	-0,82050	-0,17081	-0,45401	0,15379	-0,68955
20XH2M	0,54632	-1,04657	-0,84555	-0,04042	-0,24840	-0,01781
30XH2MA	0,66858	-0,61104	-0,52898	0,35506	-0,43134	0,33336
38X2H2MA	1,13258	-0,29404	0,47281	0,45426	0,04906	-0,07674
40XH2MA	0,68952	-0,17955	-0,32701	0,59398	-0,49276	0,50989
40X2H2MA	1,14775	-0,10909	0,35424	0,47962	-0,13336	0,12675
38XH3MA	1,20940	-0,54356	-0,11526	0,45942	-0,46426	0,06461
18X2H4MA	1,64621	-1,38032	0,02240	-0,52457	-0,06271	-0,75085
25X2H4MA	1,64278	-1,01516	0,05623	-0,12411	-0,31704	-0,47534
30XH2MΦA	1,09583	-1,08872	0,33613	0,89916	-1,74209	0,30257
36X2H2MΦ	1,52525	-0,28546	1,24338	1,05162	-1,43889	0,02355
38XH3MΦA	1,79949	-0,71224	1,09564	1,15030	-2,00746	-0,00477
45XH2MΦA	1,44018	1,13642	0,41436	1,70280	-2,62098	0,87598
20XH4ΦA	1,15819	-1,50573	-0,40841	0,19657	-1,22782	-0,15326
38X2Y	0,81711	-0,07695	0,83671	1,64069	3,83726	3,23453
38X2MYA	0,93473	-0,52171	1,48588	2,11369	4,76712	4,17965

3.5.3. Визначення відносної оброблюваності конструкційних матеріалів

Зазвичай оброблюваність конструкційних матеріалів визначають шляхом порівняння параметрів обробки досліджуваного і еталонного матеріалів при

однаковій швидкості різання. При цьому в якості еталону вибирають сталь 45. Як уже було вказано раніше, такий спосіб визначення оброблюваності вимагає довготривалих та вартісних експериментальних досліджень. Цей процес можна значно спростити й зменшити витрати часу, матеріалів та енергії шляхом використання запропонованої методики, що базується на використанні методів багатовимірного статистичного аналізу. Алгоритм цієї методики наведено на рисунку 3.10.

В якості прикладу наведемо результати стиснення початкової інформації про хімічний склад та фізико-механічні властивості якісних вуглецевих сталей. Масив початкової інформації включає 29 найменувань матеріалів, що характеризуються 12 параметрами, а саме: вміст вуглецю C , марганцю Mn , кремнію Si , фосфору P , сірки S , хрому Cr та значення R_{eH} , R_m , A , Z , KCU й HV .

Засобами факторного аналізу встановлено, що вказані параметри можна представити двома латентними змінними (факторами) з інформативністю в 79,316% (таблиця 3.17). При цьому власні значення кореляційної матриці початкових даних не перевищують 1, що вибрано в якості критерію кількості використовуваних факторів.

На рисунку 3.12 наведено графік залежності власних значень кореляційної матриці початкових даних від номера фактора для вуглецевих сталей.

В результаті обробки отриманих значень латентних змінних згідно з алгоритмами, що наведені на рисунках 3.7, 3.8, отримано коефіцієнти оброблюваності для кожного матеріалу групи якісних вуглецевих сталей. В таблиці 3.18 наведено значення латентних змінних та відповідні їм значення коефіцієнтів оброблюваності.

Таблиця 3.16.

Значення коефіцієнтів оброблюваності конструкційних матеріалів, що відносяться до групи легованих сталей

№ п.п	Найменування матеріалу	Значення коефіцієнтів оброблюваності
1	2	3
1	15X	1,017906
2	15XA	1,016673
3	20X	1,031647
4	30X	1,001284
5	30XPA	0,924364
6	35X	1,004141
7	38XA	0,962147
8	40X	1,016738

Продовження таблиці 3.16.

1	2	3
9	45X	1,032256
10	50X	1,054068
11	15Г	1,042026
12	20Г	1,046996
13	25Г	1,047456
14	30Г	1,069226
15	35Г	1,091537
16	40Г	1,108496
17	45Г	1,133188
18	50Г	1,153157
19	10Г2	1,140592
20	30Г2	1,145277
21	35Г2	1,201068
22	40Г2	1,200847
23	45Г2	1,200820
24	50Г2	1,224554
25	18ХГ	1,083357
26	18ХГТ	1,028824
27	20ХГР	1,025928
28	27ХГР	1,055469
29	25ХГТ	1,025756
30	30ХГР	1,078477
31	40ХГТР	1,063960
32	35ХГФ	0,998023
33	25ХГМ	1,014430
34	33ХС	0,994611
35	38ХС	1,004210
36	40ХС	1,075858
37	15ХМ	0,907421
38	20ХМ	0,978102
39	30ХМ	1,007448
40	30ХМА	0,972807
41	35ХМ	1,006281
42	38ХМ	0,997960
43	30Х3МФ	0,837072
44	40ХМФА	0,938052
45	15ХФ	0,946901
46	40ХФА	0,931730
47	15Н2М	0,948915
48	20Н2М	0,948136
49	20ХН	0,969156

Продовження таблиці 3.16.

1	2	3
50	40ХН	1,005627
51	45ХН	1,004289
52	50ХН	1,048473
53	20ХНР	0,938133
54	12ХН2	0,938654
55	12ХН3А	0,898751
56	20ХН3А	0,877804
57	30ХН3А	0,933817
58	12Х2Н4а	0,874198
59	20Х2Н4а	0,902986
60	20ХГСА	1,030092
61	25ХГСА	1,053635
62	30ХГС	1,048343
63	30ХГСА	1,042596
64	35ХГСА	1,042792
65	30ХГСН2А	1,000971
66	15ХГН2ТА	0,930307
67	20ХГНР	0,944127
68	20ХГНТР	0,992917
69	38ХГН	1,000995
70	14Х2Н3МА	0,882613
71	20ХН2М	0,933873
72	30ХН2МА	0,951710
72	38Х2Н2МА	0,869395
74	40ХН2МА	0,930514
75	40Х2Н2МА	0,901626
76	38ХН3МА	0,876832
77	18Х2Н4МА	0,817552
78	25Х2Н4МА	0,852060
79	30ХН2МФА	0,922030
80	36Х2Н2МФ	0,837364
81	38ХН3МФА	0,816017
82	45ХН2МФА	0,987795
83	20ХН4ФА	0,869461
84	38Х2У	0,809722
85	38Х2МУА	0,718360

Таким чином, використовуючи коефіцієнти оброблюваності можна визначити відносну оброблюваність будь якого конструкційного матеріалу даної групи відносно іншого (еталонного) матеріалу. Так, відносна оброблюваність сталі 20 відносно сталі 45 буде дорівнювати 1,21.

Таблиця 3.17.

Значення власних векторів кореляційної матриці початкових даних та відповідно їм індивідуальної і накопиченої дисперсій групи вуглецевих сталей

Номер фактору	Початкові власні значення та відповідні їм дисперсії			Дисперсії значимих компонент	
	Всього	Дисперсії кожної компоненти, %	Накопичена дисперсія, %	Дисперсії залишених компонент, %	Накопичена дисперсія, %
1	7,519	75,188	75,188	73,988	73,988
2	1,024	10,238	85,425	5,327	79,316
3	0,614	6,145	91,570		
4	0,409	4,091	95,661		
5	0,383	3,829	99,490		
6	0,022	0,224	99,714		
7	0,017	0,169	99,883		
8	0,006	0,062	99,945		
9	0,004	0,039	99,985		
10	0,002	0,015	100,000		

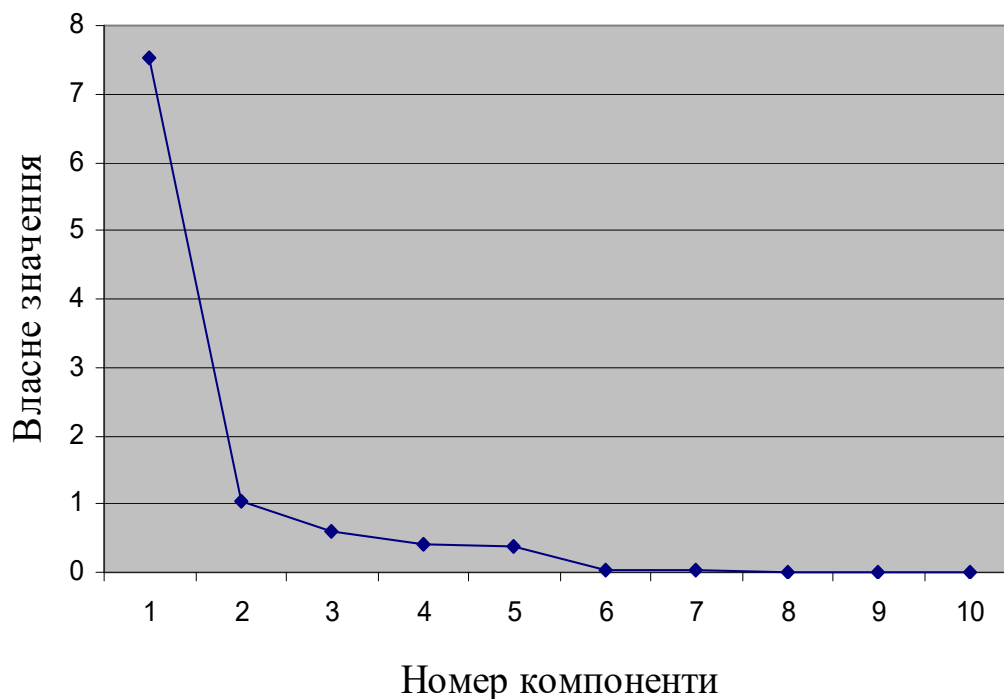


Рис. 3.12. Залежність власного значення від номера фактора для групи вуглецевих сталей.

Таблиця 3.18.

Значення латентних змінних та узагальнених коефіцієнтів для матеріалів вуглецевої групи сталей

Найменування матеріалу	Латентні змінні (фактори)		Значення коефіцієнтів оброблюваності
08кп	-1,51763	-1,60530	1,375067
08пс	-1,35058	-0,65279	1,374647
08	-1,19497	0,05984	1,370652
10кп	-1,21183	-1,27198	1,307125
10пс	-1,13828	-0,33615	1,329766
10	-0,98768	0,38090	1,329395
15кп	-1,00184	-0,40884	1,262673
15пс	-0,86491	0,40027	1,262329
15	-0,71431	1,11731	1,261955
20кп	-0,88656	-0,52769	1,208749
20пс	-0,74963	0,28142	1,208405
20	-0,59903	0,99847	1,208034
25	-0,36875	1,27017	1,147961
30	-0,21247	1,11142	1,094176
35	0,03006	0,88347	1,031523
40	0,17445	0,72658	0,985746
45	0,40476	0,52278	0,917724
50	0,56234	0,37088	0,863986
55	0,70650	0,24297	0,81795
58(55пп)	0,27481	-2,67515	0,809085
60	0,77167	0,15511	0,783299
65	0,89918	0,04143	0,73736
70	0,98471	-0,03769	0,696976
75	1,50802	-1,20505	0,530052
80	1,57263	-1,30773	0,497911
85	1,68689	-1,48115	0,454227
60Г	0,91434	0,69885	0,760821
65Г	1,11619	1,17832	0,705445
70Г	1,19192	1,06934	0,666964

Аналогічно можна визначити оброблюваність матеріалів з іншої класифікаційної групи матеріалів. Для цього треба шляхом об'єднання відповідних груп конструкційних матеріалів методами факторного аналізу визначити значення латентних змінних (факторів) для кожного матеріалу. Далі,

шляхам використання запропонованої методики вирахувати відповідні кожному матеріалу узагальнені коефіцієнти оброблюваності.

3.6. Автоматизована система обробки технологічної інформації методами багатовимірного статистичного аналізу

Наведені в розділах 2 та 3 програми обробки інформації методами багатовимірного статистичного аналізу представлено в вигляді автоматизованої системи обробки технологічної інформації. Вказана система працює під керуванням спеціальної програми-монітора. Після завантаження системи на екрані монітора з'являється робоче вікно, що наведено на рис. 3.13. Головне меню програми-монітора містить такі п'ять режимів: „ФАЙЛ”, „КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ”, „ДИСКРИМИНАНТНЫЙ АНАЛИЗ”, „ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ” та „КОМПОНЕНТНЫЙ АНАЛИЗ”. Вибір одного або іншого режиму обчислень здійснюється за допомогою клавіш <→> і <←> та підтверджується натисканням клавіші <Enter>.

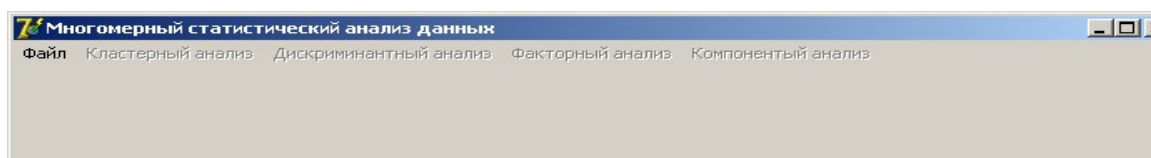


Рис. 3.13. Головне меню програми-монітора.

Режим роботи „ФАЙЛ” включає наступні підрежими: „СОЗДАТЬ ТАБЛИЦУ ДАННЫХ”, „ОТКРЫТЬ ТАБЛИЦУ ДАННЫХ”, „УДАЛИТЬ ТАБЛИЦУ ДАННЫХ” та „ВЫХОД”. Вікно цього підрежиму надано на рис. 3.14. Використовуючи наведені підрежими можна створити файл початкових даних для розв’язання відповідної задачі аналізу, зберегти його, зберегти його з новим ім’ям, відредагувати наявний файл та перейменувати його. На рис. 3.15 наведено вікно створення масиву початкових даних.

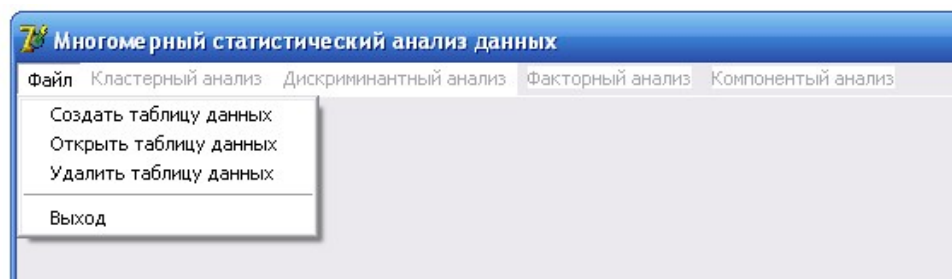


Рис.3.14. Вікно режиму роботи системи „ФАЙЛ”.

У випадку використання початкових даних, що попередньо записані в вигляді файлу, можна їх завантажити для багатовимірного аналізу за допомогою пункту підменю „ОТКРЫТИЕ ТАБЛИЦЫ ДАННЫХ” (рис. 3.16).

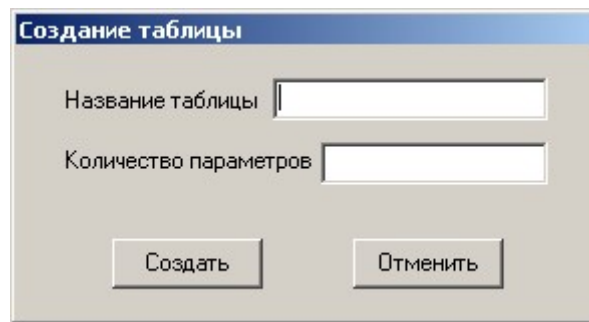


Рис. 3.15. Вікно створення масиву початкових даних.

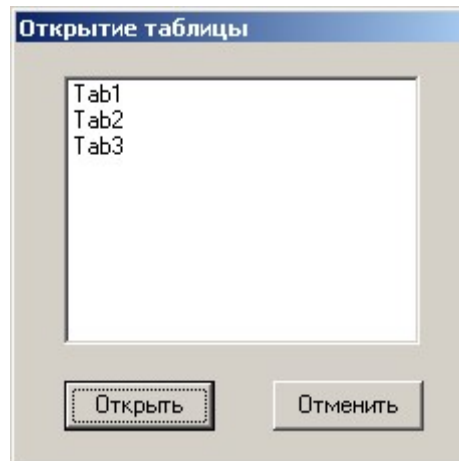


Рис. 3.16. Вікно введення початкових даних з раніше створеної бази даних.

Вікно вибору методу багатовимірного статистичного аналізу для наданого масиву початкової інформації показано на рис. 3.17

Результати виконання кластерного аналізу вибраного масиву інформації надано на рис. 3.18.

В випадку вибору дискримінантного аналізу початкової інформації, що представлена в вигляді вікна на рис.3.19, результати розрахунків надано на рис. 3.20.

Закінчення роботи з автоматизованою системою багатовимірного статистичного аналізу технологічної інформації та вихід в операційну систему здійснюється натисканням клавіші „ВЫХОД” головного меню системи.

Розроблена система дозволяє автоматизувати процес обробки технологічної інформації.

Висновки до розділу

Наведені в цьому розділі методи групування, класифікації та розпізнавання образів можна успішно застосувати при розв'язанні таких технологічних задач.

1. Дана множина конструкційних матеріалів, що характеризуються сукупністю ознак, у якості яких застосовуються хімічний склад, структура, фізико-механічні властивості тощо. Визначити параметри, що істотно впливають на технологічні характеристики цих матеріалів.

2. На основі даних, зазначених у попередній задачі, класифікувати конструкційні матеріали за спільністю їх технологічних характеристик.

3. За наданими параметрами досліджуваного конструкційного матеріалу знайти групу (кластер), до якого він відноситься, а в обраній групі знайти матеріал-аналог. Цей матеріал може використовуватися для заміни досліджуваного матеріалу, аналогічного йому за сукупністю різних властивостей.

Название	Группа	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
25	1	0,26	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	530	275
30	1	0,31	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	530	320
35	1	0,36	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	470	245
40	1	0,41	0,27	0,65	0,25	0,035	0,25	0,3	580	340
45	1	0,46	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	590	245
50	1	0,51	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	570	315
55	1	0,56	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	570	315
60	1	0,61	0,27	0,65	0,25	0,04	0,25	0,25	700	510
35Г	1	0,36	0,27	0,85	0,3	0,035	0,3	0,3	570	340
35Х	1	0,35	0,27	0,65	0,3	0,035	0,95	0,3	655	490
35ХГ2	1	0,36	0,27	1,75	0,3	0,035	0,55	0,3	830	685
35ХГН2	1	0,36	0,27	0,65	1,25	0,035	0,85	0	637	480
35ХГСА	1	0,355	1,25	0,95	0,3	0,025	1,25	0,3	660	490
35ХГФ	1	0,345	0,27	1,15	0	0,035	1,15	0	930	800
35ХН1М2ФА	1	0,36	0,37	0,65	1,5	0,022	1,5	0,25	785	640
36Х2Н2МФА	1	0,365	0,27	0,375	1,5	0,25	1,5	0,3	1180	1080
38Х2Н2МА	1	0,365	0,27	0,375	1,5	0,025	1,5	0,3	1080	930
38Х2Н3М	1	0,385	0,27	0,65	3	0,035	1,25	0	1000	900
38Х2НМ	1	0,37	0,27	0,65	0,75	0,03	2,05	0	830	680

Рис. 3.17. Вікно вибору методу статистичної обробки інформації.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Кластерный анализ данных. Иерархический метод. Групп: 2													
2														
3		Группа 1	Группа 2											
4	Группа 1	-----	0,050451											
5	Группа 2	-----	1											
6														
7	Группа 1:	36Х2Н2МФА	35ХГН2	35ХН1М2ФА	38Х2НМ	35ХГФ	38Х2Н3М	38Х2Н2МА						
8	Группа 2:	20	25	30	35	45	50	55	40	35Г	35Х	60	35ХГ2	35ХГСА
9														
10														
11														

Рис. 3.18. Вікно з результатами кластерного аналізу даних.

Microsoft Excel - D_A_Kontr_pr.xls

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

I27

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Название	Группа	x1	x2	x3	x4	x5	x6
2	4_8	4	7	10	5	8	26	16
3	4_7	4	7	8	6	9	18	2
4	4_6	4	8	9	2	8	26	16
5	4_5	4	9	10	26	8	27	16
6	4_4	4	15	2	2	2	7	2
7	4_3	4	9	3	2	8	21	7
8	4_2	4	4	12	3	8	23	7
9	4_1	4	3	10	8	8	23	8
10	3_7	3	17	3	2	7	6	3
11	3_6	3	8	10	5	8	27	16
12	3_5	3	6	9	10	5	23	11
13	3_4	3	8	5	16	16	16	7
14	3_3	3	4	13	10	7	21	15
15	3_2	3	9	4	10	7	9	9
16	3_1	3	3	11	9	15	20	10
17	2_7	2	7	10	5	8	27	17
18	2_6	2	7	9	8	2	19	9
19	2_5	2	7	8	9	6	18	2
20	2_4	2	1	6	8	14	14	13

Рис. 3.19. Вікно початкових даних для виконання дискримінантного аналізу даних.

Microsoft Excel - D_A_Kontr_pr.xls

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

A1

Дискриминантный анализ данных

	A	B	C	D	E	F	G	H
4								
5	Дискриминантная функция для группы 2							
6	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
7	-26,077	2,779353	2,417992	-0,01128	1,777098	0,292069	-0,19705	
8	Дискриминантная функция для группы 3							
9	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
10	-35,3579	3,339745	3,002274	0,005339	2,183471	0,10963	-0,13284	
11	Дискриминантная функция для группы 4							
12	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
13	-32,9557	3,144077	2,470367	-0,03764	1,941113	0,518382	-0,36325	
14								
15	Преобразование функций классификации для каждого наблюдения							
16	Название Вероятность, соответствующая наибольшей дискриминантной функции							
17	Группа 1							
18	2_7				0,494507			
19	2_6				0,656551			
20	2_5				0,581723			
21	2_4				0,727982			
22	Группа 2							
23	3_7				0,911104			
24	3_6				0,55781			
25	3_5				0,528076			
26	3_4				0,757148			
27	3_3				0,625836			
28	3_2				0,478746			
29	3_1				0,807141			
30	Группа 3							
31	4_8				0,464438			
32	4_7				0,622391			
33	4_6				0,571269			
34	4_5				0,518202			
35	4_4				0,385894			
36	4_3				0,791929			
37	4_2				0,499856			
38	4_1				0,531574			
39								

Результаты / Исходные данные

Готово

Рис. 3.20. Вікно з результатами дискримінантного аналізу даних.

4. За наданими параметрами нового конструкційного матеріалу визначити умови і методи його обробки на основі визначення аналогічних умов матеріалу – аналога.

5. Всі деталі, що виготовляються на підприємстві, можна класифікувати за сукупністю конструктивних і технологічних ознак. Кожній деталі, що знаходиться в базі даних підприємства, ставиться у відповідність технологічний процес її обробки. Шляхом ідентифікації нової деталі за сукупністю конструктивно-технічних ознак, можна знайти деталь-аналог, технологічний процес виготовлення якої буде основою для створення технологічного процесу виготовлення нової деталі.

Застосування методів стиснення інформації, класифікації і розпізнавання образів дозволяє значно спростити ряд задач технологічної підготовки виробництва за рахунок зменшення ознакового простору, скорочення обсягів оброблюваної інформації, групування об'єктів за сукупністю конструктивно-технологічних ознак і пошуку аналогів, скоротити час розв'язання різних технологічних задач, а також підвищити якість одержуваних рішень.

Основні методи багатовимірної статистичної аналізу формалізовані та представлені у вигляді схем алгоритмів, що наведені в розділах 2 і 3. Ці алгоритми програмно реалізовані та апробовані при розв'язанні різноманітних технологічних задач, за результатами яких можна зробити наступні висновки:

а) методам багатовимірної статистичної аналізу інформації характерні математична суворість і закінченість методик;

б) багатовимірний статистичний аналіз варто використовувати при наявності значних обсягів інформації про об'єкт дослідження і моделювання;

в) методи факторного та компонентного аналізу дозволяють ефективно стиснути масиви вихідних даних;

г) за допомогою методів факторного та компонентного аналізу можна оцінити характер взаємозв'язків між параметрами і одержати попередню математичну модель досліджуваного об'єкта;

д) запропонований метод класифікації без втрати її якості з використанням методів компонентного та кластерного аналізу інформації дозволяє зменшити (стиснути) вихідний простір у 2...5 разів і скоротити час обчислень у 1,5 ... 2 рази;

е) вище надані результати використання дискримінантних функцій для дослідження технологічних параметрів конструкційних матеріалів дозволяють зробити висновок про ефективність методів багатовимірної статистичної аналізу при технологічній підготовці машино - та приладобудівного виробництва;

ж) створена система багатовимірної статистичної аналізу дозволяє автоматизувати процес обробки технологічної інформації, що реалізує наведені в розділах 2 та 3 методи стиснення масивів інформації, класифікації та розпізнавання образів. В основу розробленої системи покладені алгоритми що представлені в розділах 2 і 3. На відміну від наявних систем статистичної обробки інформації наведена система є проблемно-орієнтованою, простою в використанні та не потребує значних ресурсів ПК.

Перелік посилань до розділу 3

- 3.1. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциалных функций в теории обучения машин. – М.: Наука, 1970. – 384 с.
- 3.2. Аркадьев А.Г., Браверман Э.М. Обучение машины классификации объектов. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
- 3.3. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
- 3.4. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976. – 511 с.
- 3.5. Дорофеюк А.А. Алгоритмы автоматической классификации. //Автоматика и телемеханика, 1971, №12. – С. 61–65.
- 3.6. Фу К. Структурные методы в распознавании образов. – М.: Мир, 1977. – 319 с.
- 3.7. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. Пер. с англ. Е.З. Демиденко. Научн. ред. и предисл. А.Я. Боярского. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.
- 3.8. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистик: Учебн. для студ. вузов напр. и спец. «Статистика». – М.: Финансы и статистика, 1996. – 356 с.
- 3.9. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
- 3.10. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов /Пер. с англ. – М.: Наука, 1979. – 367с.
- 3.11. Патрик Э.А. Основы теории распознавания образов: Пер. с англ./ Под ред. Б.Р.Левина. – М.: Советское радио. 1980. – 408 с.
- 3.12. Кильдишев Г.С., Аболенцев Ю.И. Многомерные группировки. – М.: Статистика, 1978. – 160 с.
- 3.13. Миркин Б.Г. Группировки в социально-экономических исследования. Методы построения и анализа. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 232 с.
- 3.14. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 488 с.
- 3.15. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; Под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
- 3.16. Классификация и кластер. /Под ред. Д. В. Райзина. – М.: Мир, 1980. – 390 с.
- 3.17. Загоруйко Н.Г., Елкина В.Н., Емельянов С.В., Лбов Г.С. Пакет прикладных программ ОТЭКС (для анализа данных). – М.: Финансы и статистика, 1986. – 160 с.
- 3.18. Абусев Р.А., Лумельский Я.П. Статистическая групповая классификация: Учебное пособие по спецкурсу. – Пермь: ПГУ, 1987. – 90 с.
- 3.19. Жамбью М. Иерархический кластер-анализ и соответствия: Пер. с фр. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 342 с.

- 3.20. Мандель И.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
- 3.21. Апраушева Н.Н., Ражабов Б.Ж. Экспериментальные исследования по обнаружению кластеров. – М.: ВЦ АН СССР, 1989. – 26 с.
- 3.22. Воронин Ю.А. Начала теории сходства. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. – 128 с.
- 3.23. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: Пер с англ. /Дж. – О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др.; Под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
- 3.24. Васильев В.И. Проблема обучения распознаванию образов. – К.: Выща школа, 1989. – 64 с.
- 3.25. Елисеева И.М., Рукавишников В.О. Группировка, корреляция и распознавание образов. Статистические методы классификации и измерения связей. – М.: Статистика, 1977. – 143 с.
- 3.26. Выслоух С.П. Снижение размерности, классификация и распознавание образов в технологии приборостроения. //Приладобудування 2002: підсумки і перспективи: Збірник тез науково-технічної конференції. – Київ : МПП “ТЕМП2, 2002. – С. 76 - 77.
- 3.27. Выслоух С.П. Применение методов многомерного статистического анализа при решении технологических задач. //Материалы двадцать второй ежегодной международной конференции «Композиционные материалы в промышленности». 1-5 июня. Ялта – Киев. УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2002. – С. 148 – 150.
- 3.28. Выслоух С.П. Распознавание образов, классификация и снижение размерностей при проектировании процессов абразивной обработки. // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сборник статей международной научно-технической конференции. Волжский инженерно-строительный институт (филиал) ВолгГАСА. – Волжский, 2003. – С. 212–216.
- 3.29. Выслоух С.П. О проектировании технологии в условиях мелкосерийного производства Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях. Материалы Четвертой ежегодной Промышленной конференции. – Славское, 2004. – С. 133–135.
- 3.30. Вислоух С.П. Багатомірний аналіз даних в задачах технологічної підготовки виробництва. // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2005. – №12. – С. 41–50.
- 3.31. Выслоух С.П. Проектирование технологии в условиях автоматизированного производства. //Перспективные технологии, оснастка и методология подготовки производства. Научный технический сборник. – Киев: НТУУ «КПИ», 1997. – С. 89–92.
- 3.32. Выслоух С.П. Проектирование технологии в условиях многономенклатурного производства. //Резание и инструмент в

технологических системах. Междун. научно-технический сборник. Выпуск 55. Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 56–59.

3.33. Выслоух С.П., Держук В.А. Автоматизация проектирования технологии ремонтных работ. //Сб. «Технология ремонта машин и механизмов» (Ремонт – 98). – Киев: 1998. – С. 56-57.

3.34. Выслоух С.П. Применение методов кластерного анализа при проектировании технологических процессов. //Вестник Сев. ГТУ. Выпуск 36: Автоматизация процессов и управление. Сб. Научн. Трудов Севастоп. Нац. Техн. ун-та. – Севастополь, 2002. – С. 103–108.

3.35. Вислоух С.П. Розпізнавання образів при проектуванні технологічних процесів. // Резание и инструмент в технологических системах. – Международный научно-технический сборник. –Выпуск 65. – Харьков, НТУ "ХПИ", 2003. – С.27–36.

3.36. Выслоух С.П. Применение методов многомерного статистического анализа при технологической подготовке производства. //Новые процессы и их модели в ресурсо- и энергосберегающих технологиях: Материалы Международной научно-технической конференции, 25–26 сентября 2003 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2003. – С. 16–20.

3.37. Вислоух С.П. Проектування технологічних процесів на основі розпізнавання образів. //Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування. Вип. 26, – Київ, 2003. – С. 65–73.

3.38. Выслоух С.П. Анализ данных и распознавание образов при решении технологических задач. //Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении. Материалы 4-го Международного научно-технического семинара, 24 – 26 февраля 2004 г., г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2004. – С. 34–39.

3.39. Александров В.В., Горский Н.Д. Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. – Л.: Наука. Ленинградское отделение, 1983. – 208 с.

3.40. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. – М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2001. – 270 с.

3.41. Александров В.В. и др. Анализ данных на ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 191 с.

3.42. Выслоух С.П. Применение методов дискриминантного анализа при технологическом проектировании. //Резание и инструмент в технологических системах. Междун. научн.-техн. сборник. –Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 26–35.

3.43. Вислоух С.П. Проектування технології виготовлення деталей на основі їх класифікації і групування. / Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: Материалы 6-го Международного научно-технического семинара, 21-23 февраля 2006 г., Свалява. – Киев, АТМ Украины, 2006. – С. 28–30.

3.44. Выслоух С.П., Воронюк А.С. Определение технологических параметров конструкционных материалов методами многомерного статистического анализа. //Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ "ХПІ" – Харків, 2002. –Вип. 1(5). – С. 64–71.

3.45. Зенкин А.И., Ленский А.Л. Ускоренное решение задач классификации в факторном пространстве без потери точности. – М.: ВЦ АН СССР, 1990. – 42 с.

3.46. Нормативы режимов резания и времени на механическую обработку деталей на станках с программным управлением. – М.: Научно-исследовательский институт авиационных технологий, 1983. – 292 с.

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ 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.

4.1 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 керування входних змінних $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Тоді задача оптимізації зводиться до визначення таких значень $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$, при яких цільова функція $F(X^*)$, що відображає економічні, технологічні, конструктивні та інші показники технологічного об'єкта, тобто вихідні змінні $y_j, j=1, 2, \dots, m$, 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

$$\tilde{y} = f(y, u, \eta); \quad y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}; \quad u \in U; \quad \eta \in \theta, \quad (4.1)$$

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 (4.1) 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 [4.1 – 4.7]. 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 [4.1 – 4.3, 4.8]. Тому виникає потреба оцінки області та доцільності використання наявних методів математичного моделювання параметрів і ефективності застосування при моделюванні новітніх сучасних методів.

4.2 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 [4.8 – 4.10].

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 [4.8, 4.10, 4.11].

Для визначеності процесу декомпозиції вводять чисельну міру складності моделі [4.1]. 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 [4.8 – 4.10].

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

$$L_D \rightarrow \min \Rightarrow D^*, D^* \in \{D\}, \quad (4.2)$$

де D – операція декомпозиції;

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

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

На рисунку 4.1 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:

$$L(k, q) = (n + q)^\gamma k + k^\gamma (m + q). \quad (4.3)$$

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

$$D_i = \langle k_i, q_i \rangle, i=1, \dots, N. \quad (4.4)$$

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

$$L(k_i, q_i) = \min \{L(k_i, q_i)\}, i=1, \dots, N. \quad (4.5)$$

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 здійснюватись 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. 4.1) 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.

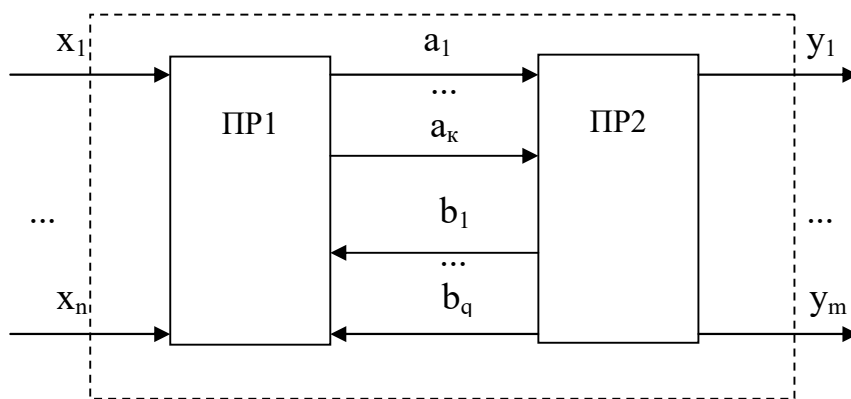


Рис. 4.1. Схема декомпозиції технологічного процесу різання як складної системи на два елементи

4.3 Чисельні методи моделювання

4.3.1 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 ЕОМ. 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.

Лінійність або нелінійність стосовно вхідних параметрів – це не те ж саме, що лінійність або нелінійність вихідних змінних (функцій) за параметрами [4.8 – 4.10]. 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:

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

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:

$$\ln T = \ln C - a_v \ln V - a_s \ln s - a_t \ln t,$$

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 [4.12]:

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

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:

$$Ra \leq Ra_{\text{зад}} ;$$

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max} ; n_{\min} \leq n \leq n_{\max}.$$

Наведені співвідношення являють собою математичну модель технологічного процесу різання з врахуванням обмежень на процес різання [4.13].

В математичних моделях часто використовують ряд нелінійних математичних структур, у першу чергу, це степеневі поліноми [4.8].

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

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

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

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:

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

Модифікаціями зазначених поліномів є інтерполяційні поліноми Стерлінга

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

$$\times \frac{\Delta^3 y_{-2} + \Delta^3 y_{-1}}{2} + \dots + \frac{g(g^2 - 1^2)(g^2 - 2^2)\dots[g^2 - (n-1)^2]}{(2n)!} \Delta^{2n} y_{-n}$$

і Беселя

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

Для нерівно віддалених вузлів інтерполяції використовують інтерполяційний поліном Лагранжа

$$P(x) = \sum_{i=0}^n y_i \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{i-1})(x-x_{i+1})\dots(x-x_n)}{(x_i-x_0)(x_i-x_1)\dots(x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1})\dots(x_i-x_n)}.$$

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

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

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

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

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

Особливе місце серед відомих математичних структур займають ортогональні поліноми [4.14 – 4.19]. Найбільш часто використовують ті ортогональні поліноми Чебишева, що визначені для проміжку $[-1, +1]$. Поліном Чебишева першого роду представляється виразом

$$P(x) = \frac{a_0}{2} T_0(x) + a_1 T_1(x) + a_2 T_2(x) + \dots,$$

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

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

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

$$P(x) = a_0 H_0(x) + a_1 H_1(x) + a_2 H_2(x) + \dots,$$

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

Для періодичних функцій використовують тригонометричні поліноми

$$P(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i \cos ix + b_i \sin ix).$$

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:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x-x_i) + \frac{c_i}{2}(x-x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x-x_i)^3, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad i=1,2,\dots,n,$$

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.

4.3.2 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.

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:

$$E_q = (f(x_q) - \Phi(x_q))^2 \rightarrow \min, \quad (4.6)$$

де E_q - величина похибки апроксимації;
 $f(x_q)$ - початкова (реальна) функція; $\Phi(x_q)$ - апроксимуюча функція;
 $q = 1, 2, \dots, n$, n - кількість контрольних (опорних) точок, що використовуються при апроксимації [4.14 – 4.19].

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

$$\Phi(x) = \sum_{r=1}^p K_r \cdot \varphi_r(x), \quad (4.7)$$

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 (4.7) 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 за критерієм Фішера [4.20 – 4.25].

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:

$$\Phi(X) = H(V, s, t, \tau) = C_0 \cdot V^{a_1} \cdot s^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot \tau^{a_4}$$

або
$$\Phi(X) = H(V, s, t, \tau) = 2^{a_0} \cdot V^{a_1} \cdot s^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot \tau^{a_4},$$

де $a_0 = \log_2 C_0$.

Така заміна необхідна для отримання лінійної системи рівнянь.

Після логарифмування обох частин рівняння даного виразу отримаємо

$$\ln(H(V, s, t, \tau)) = \ln(2^{a_0} \cdot V^{a_1} \cdot s^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot \tau^{a_4});$$

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

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_3 та a_4 , з якими вони входять в структуру математичної моделі.

Значення V_q , s_q , t_q , τ_q , а також величина зносу H_q є параметрами експериментальних досліджень. В таблиці 4.1 наведено результати дослідження зносу різального інструменту по задній грані при токарній обробці легованої сталі 40X13 прохідним різцем з пластинкою з твердого сплаву ВК8.

Таблиця 4.1

Результати дослідження величини зносу різального інструменту при токарній обробці сталі 40X13 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 $\varphi = 45^\circ$, допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 45^\circ$, передній кут $\alpha = 10^\circ$, задній кут $\gamma = 2^\circ$, радіус при вершині різця $r = 0,2$ мм						
Параметр виміру	Од. вим.	Номер дослідів							
		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.

4.4 Експериментально-статистичні методи побудови математичних моделей

В багатьох випадках аналітично одержати математичні моделі (4.7) 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.

4.4.1 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 запропонована Н. Вінером ідея „чорної скриньки” [4.21 – 4.36]. 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 I). 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:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.8)$$

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

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

Рівнянню (4.8) 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 приходить обмежитись представленням її поліномом:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1, \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (4.9)$$

де b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – коефіцієнти залежності, які можливо одержати методами регресійного аналізу, використовуючи результати експерименту [4.21, 4.23, 4.25, 4.26, 4.34]. 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 (4.9), 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 вимірювались 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

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k$$

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 виставлятися 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 [4.21, 4.29 – 4.39]. 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 ступінь 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 $x_i, i = 1, 2, \dots, k$.

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.

4.4.2 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 $\bar{x}\{x_1, \dots, x_k\}$ й вихідною змінною $y_i (i = \overline{1, m})$. Надалі будемо вважати, що об'єкт дослідження або однорідний або вихідні змінні незалежні одна від одної.

При використанні методу регресійного аналізу повинні виконуватися такі умови [4.27, 4.29, 4.34]:

1) результати спостережень y_1, \dots, 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 $D_{y_l} (l = \overline{1, N})$ цих випадкових величин повинні бути однаковими (вибіркові дисперсії s_l^2 однорідні); всі значення вхідних величин $x_j (j = \overline{1, k})$ повинні вимірюватися з відносно малою похибкою в порівнянні з похибкою вимірювання вихідної величини y ;

3) вхідні змінні $x_j (j = \overline{1, k})$ 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 (4.8) 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 (4.8) представимо у вигляді полінома розкладання в ряд Тейлора:

$$y = f(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j x_j + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^n b_{jj} x_j^2 \dots, \quad (4.10)$$

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. 4.2 та виконано його програмну реалізацію.

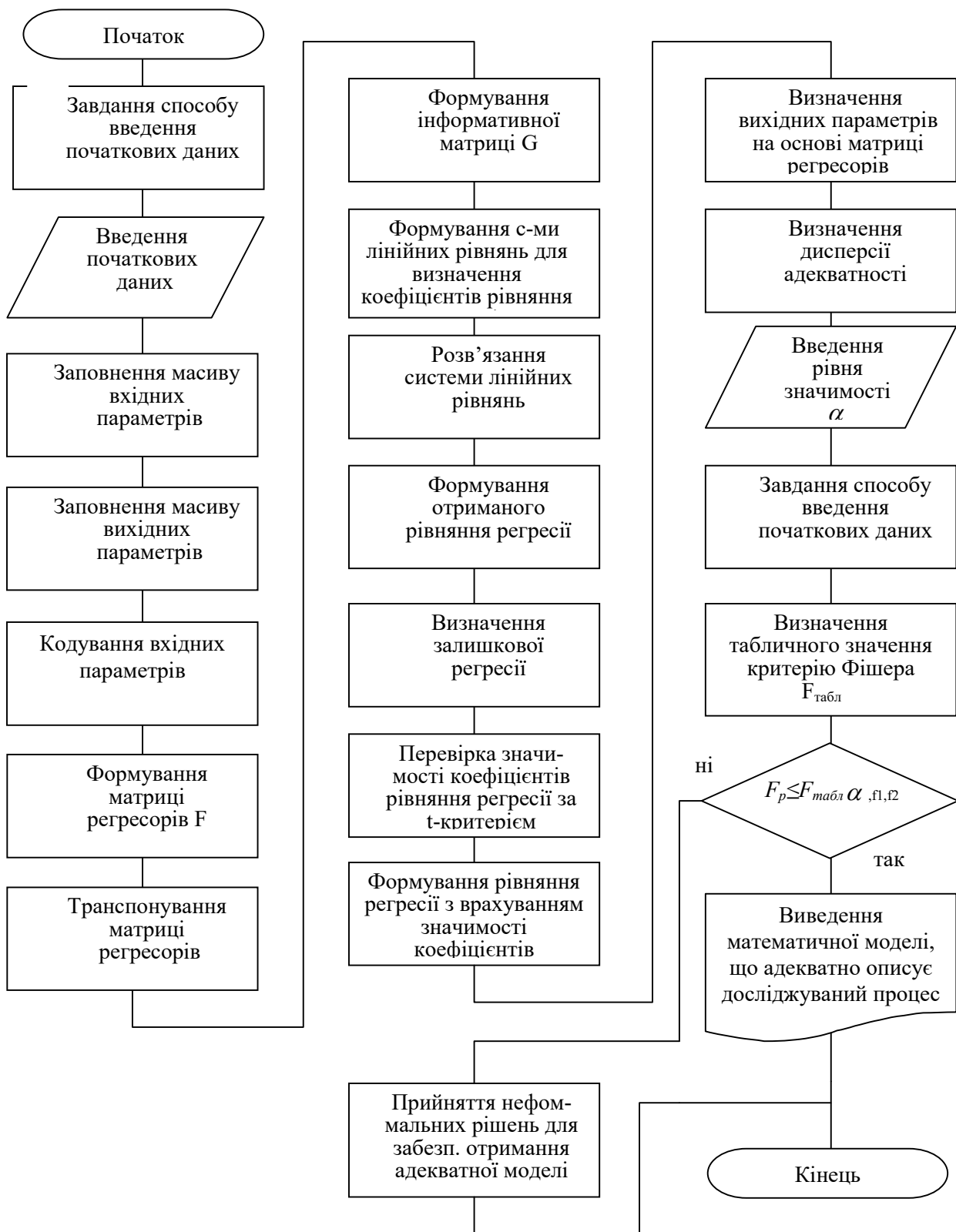


Рис. 4.2. Алгоритм методу регресійного аналізу даних.

Як приклад використання регресійного аналізу покажемо [4.39] 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 $Z=(z_1, z_2, \dots, z_n)$, 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 вибіркового дослідів, встановлені інтервали варіювання вхідних величин (факторів) $X_1 \dots X_5$ для 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. 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:

$$Y_1 = (2.6597 + 0.44878x_1 + 0.35685x_2 - 0.39622x_3 - 0.83013x_4 + 2.993x_5 + 0.030247x_1x_2 - 0.03361x_1x_3 - 0.0704258x_1x_4 + 0.25392x_1x_5 - 0.02662x_2x_3 - 0.055768x_2x_4 + 0.20107x_2x_5 + 0.06192x_3x_4 - 0.223326x_3x_5 - 0.4677458x_4x_5 + 0.019116x_1^2 + 0.0119865x_2^2 + 0.014778x_3^2 + 0.064866x_4^2 + 0.84323x_5^2)^2;$$

$$Y_2 = (2.0982 + 0.9264x_1 + 0.129x_2 + 0.0905x_3 - 0.86385x_4 + 2.08544x_5 + 0.02851x_1x_2 + 0.019971x_1x_3 - 0.19071x_1x_4 + 0.4604x_1x_5 + 0.0265796x_2x_4 + 0.064166x_2x_5 - 0.0186244x_3x_4 + 0.0449626x_3x_5 - 0.429297x_4x_5 + 0.1022646x_1^2 + 0.0889134x_4^2 + 0.518189x_5^2)^2,$$

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.

4.5. 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 [4.40 – 4.44]. 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.

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 теoreмах, що встановлюють зв'язки між величинами, які характеризують природу процесів [4.40, 4.41]. 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 -теoreми, 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

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

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 основні 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 [4.40], якщо існують однозначні співвідношення виду

$$F(P_1, P_2, \dots, P_m) = 0 \quad (4.11)$$

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

$$\Phi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{m-k}) = 0 \quad (4.12)$$

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 (4.11) 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:

$$F\left(\frac{P_1}{P_{01}}, \frac{P_2}{P_{02}}, \dots, \frac{P_i}{P_{0i}}, \dots, \frac{P_k}{P_{0k}}, \frac{P_{k+1}}{P_{0k+1}}, \dots, \frac{P_s}{P_{0s}}, \dots, \frac{P_m}{P_{0m}}\right) = 0. \quad (4.13)$$

Однак не всі величини можна вибрати довільно. Можна встановити, яка кількість незалежних величин P_{01}, \dots, P_{0k} вибирається із загальної множини величин P_{01}, \dots, P_{0m} , і визначити спосіб їх вибору, розглянувши формули розмірностей всіх величин, що входять в співвідношення (4.13) [4.41].

Кожну величину, що входить в рівняння (4.12) 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, \dots, q , запишемо вирази одиниць виміру всіх величин, що приймають участь, тобто їх формули розмірностей:

$$\begin{aligned} [p_1] &= [a^{\alpha_1} b^{\beta_1} \dots q^{\varepsilon_1}] = [p_{01}]; \\ [p_2] &= [a^{\alpha_2} b^{\beta_2} \dots q^{\varepsilon_2}] = [p_{02}]; \\ [p_i] &= [a^{\alpha_i} b^{\beta_i} \dots q^{\varepsilon_i}] = [p_{0i}]; \\ [p_k] &= [a^{\alpha_k} b^{\beta_k} \dots q^{\varepsilon_k}] = [p_{0k}]; \\ [p_s] &= [a^{\alpha_s} b^{\beta_s} \dots q^{\varepsilon_s}] = [p_{0s}]; \\ [p_m] &= [a^{\alpha_m} b^{\beta_m} \dots q^{\varepsilon_m}] = [p_{0m}], \end{aligned} \quad (4.14)$$

де $\alpha, \beta \dots \varepsilon$ – деякі числа.

Зроблене раніш припущення, що одиниці виміру $[p_{01}] \dots [p_{0m}]$ 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 $(1, 2, \dots, k)$ одиниць, що входять в (4.14). 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

$$\begin{aligned} [P_{0k+1}] &= \psi_{k+1}([p_{01}], [p_{02}], \dots, [p_{0i}], \dots, [p_{0k}]); \\ [P_{0s}] &= \psi_s([p_{01}], [p_{02}], \dots, [p_{0i}], \dots, [p_{0k}]); \\ [P_{0m}] &= \psi_m([p_{01}], [p_{02}], \dots, [p_{0i}], \dots, [p_{0k}]); \end{aligned} \quad (4.15)$$

Покажемо, що це дійсно так. Для цього прологарифмуємо перші k рівнянь в (4.14), в результаті цього одержимо систему k лінійних рівнянь зі сталими коефіцієнтами:

$$\begin{aligned}
\ln [P_{01}] &= \alpha_1 \ln[a] + \beta_1 \ln[b] + \dots + \varepsilon_1 \ln[q]; \\
\ln [P_{02}] &= \alpha_2 \ln[a] + \beta_2 \ln[b] + \dots + \varepsilon_2 \ln[q]; \\
&\vdots \\
\ln [P_{0i}] &= \alpha_i \ln[a] + \beta_i \ln[b] + \dots + \varepsilon_i \ln[q]; \\
&\vdots \\
\ln [P_{0k}] &= \alpha_k \ln[a] + \beta_k \ln[b] + \dots + \varepsilon_k \ln[q];
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Розв'язавши цю систему відносно $[a], [b], \dots, [q]$, отримаємо:

$$\begin{aligned}
[a] &= [P_{01}]^{A_{11}/D} [P_{02}]^{A_{21}/D} \dots [P_{0i}]^{A_{i1}/D} [P_{0k}]^{A_{k1}/D} \\
[b] &= [P_{01}]^{A_{12}/D} [P_{02}]^{A_{22}/D} \dots [P_{0i}]^{A_{i2}/D} [P_{0k}]^{A_{k2}/D} \\
[q] &= [P_{01}]^{A_{1k}/D} [P_{02}]^{A_{2k}/D} \dots [P_{0i}]^{A_{ik}/D} [P_{0k}]^{A_{kk}/D}.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

Тут

$$D = \begin{vmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \dots & \varepsilon_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \dots & \varepsilon_2 \\ \alpha_i & \beta_i & \dots & \varepsilon_i \\ \alpha_k & \beta_k & \dots & \varepsilon_k \end{vmatrix} \tag{4.18}$$

– визначник k -го порядку, що складений з коефіцієнтів системи (4.16);

$A_{11}, A_{21}, \dots, A_{k1}, A_{12}, A_{22}, \dots, A_{k2}, \dots, A_{1k}, A_{2k}, \dots, A_{kk}$ – показники елементів визначника D (перший індекс відповідає номеру рядка, другий – номеру стовпчика).

Підставивши вираз (4.17) в інші $m-k$ рівнянь системи (4.14) 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 $P_{01} P_{02} \dots P_{0k}$. Так, наприклад для P_{0k+1} будемо мати

$$\begin{aligned}
[P_{0k+1}] &= [P_{01}]^{A_{11}^{k+1}/D} \dots [P_{0k}]^{A_{k1}^{k+1}/D} [P_{01}]^{A_{12}^{k+1}/D} \dots \\
&\dots [P_{0k}]^{A_{k2}^{k+1}/D} \dots [P_{01}]^{A_{1k}^{k+1}/D} \dots [P_{0k}]^{A_{kk}^{k+1}/D}
\end{aligned} \tag{4.19}$$

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

$$[P_{01}] = [P_{01}]^{D_{1S}/D} [P_{02}]^{D_{2S}/D} \dots [P_{0i}]^{D_{iS}/D} \dots [P_{0k}]^{D_{kS}/D} \tag{4.20},$$

тоді для P_{0s} маємо

$$\alpha_s' = D_{1S}/D, \gamma_s' = D_{2S}/D; \varepsilon_s' = D_{iS}/D \tag{4.21}$$

Значення величин D_{ij} , де $j=1,2,\dots,k$, $s=k+1,\dots,m$ вираховують із визначника (4.18) після заміни в ньому j -го рядка на рядок, що складений з показників степені $\alpha_s', \beta_s', \varepsilon_s'$ величин $[P_{0s}]$, $s=k+1,\dots,m$.

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 ($P_{0k+1}, P_{0k+2}, \dots, P_{0s}, \dots, P_{0m}$) є добутками незалежних величин в вибраних степенях $\alpha_s, \gamma_s, \dots, \varepsilon_s$, де $s=k+1, k+2, \dots, m$.

З врахуванням (4.15) можна переписати (4.13) у вигляді:

$$F\left(\frac{P_0}{P_{01}}, \dots, \frac{P_i}{P_{0i}}, \dots, \frac{P_k}{P_{0k}}, \frac{P_{k+1}}{P_{01}^{\alpha_{k+1}'} P_{02}^{\beta_{k+1}'} \dots P_{0k}^{\varepsilon_{k+1}'}}}, \dots, \frac{P_s}{P_{01}^{\alpha_s'} P_{02}^{\beta_s'} \dots P_{0k}^{\varepsilon_s'}}, \dots, \frac{P_m}{P_{01}^{\alpha_m'} P_{02}^{\beta_m'} P_{0k}^{\varepsilon_m'}}\right) = 0 \quad (4.22)$$

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

$$F_l = (1, 1, \dots, 1, \pi_l, \pi_{s-k}, \pi_{m-k}) = 0, \quad (4.23)$$

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

$$\pi_l = \frac{P_{k+1}}{P_1^{\alpha_{k+1}'} P_2^{\beta_{k+1}'} \dots P_k^{\varepsilon_{k+1}'}}}, \pi_{s-k} = \frac{P_s}{P_1^{\alpha_s'} P_2^{\beta_s'} \dots P_k^{\varepsilon_s'}}, \pi_{m-k} = \frac{P_m}{P_1^{\alpha_m'} P_2^{\beta_m'} P_k^{\varepsilon_m'}} \quad (4.24)$$

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 однакові, тому що

$$\pi = \left[\frac{P_s}{P_1^{\alpha_s'} P_2^{\beta_s'} \dots P_k^{\varepsilon_s'}} \right] = 1$$

або

$$[P_s] = [P_1]^{\alpha_s'} [P_2]^{\beta_s'} \dots [P_k]^{\varepsilon_s'} \quad (4.25)$$

Підставляючи в (4.25) основні одиниці виміру, отримаємо

$$a^{\alpha_s} b^{\beta_s} \dots q^{\varepsilon_s} = \frac{(a^{\alpha_1} b^{\beta_1} \dots q^{\varepsilon_1})^{\alpha_s'}}{(a^{\alpha_k} b^{\beta_k} \dots q^{\varepsilon_k})^{\varepsilon_s'}} \dots (a^{\alpha_2} b^{\beta_2} \dots q^{\varepsilon_2})^{\beta_s'} \dots \quad (4.26),$$

звідки виходить, що

$$\begin{aligned} \alpha_s &= \alpha_1 \alpha_s' + \alpha_2 \beta_s' + \dots + \alpha_k \varepsilon_s' \\ \beta_s &= \beta_1 \alpha_s' + \beta_2 \beta_s' + \dots + \beta_k \varepsilon_s' \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_1 \alpha_s' + \varepsilon_2 \beta_s' + \dots + \varepsilon_k \varepsilon_s' \end{aligned} \quad (4.27)$$

Одержані вище k співвідношень (4.27) визначають зв'язок між відомими показниками розмірностей основних одиниць виміру ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s$) та шуканими критеріальними показниками ($\alpha', \dots, \epsilon'$), 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 (4.23) 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.

Узагальнена схема алгоритму визначення параметрів наведена на рис. 4.3.

Відповідно до цього алгоритму необхідно: визначити m параметрів $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_m$, які характеризують досліджуваний процес, скласти матрицю розмірностей m , використовуючи n основних фізичних одиниць виміру; вибрати k незалежних між собою параметрів; скласти матрицю розмірностей з k 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 (4.21). 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 (4.24) до (4.27) знайдемо досить прості рівняння

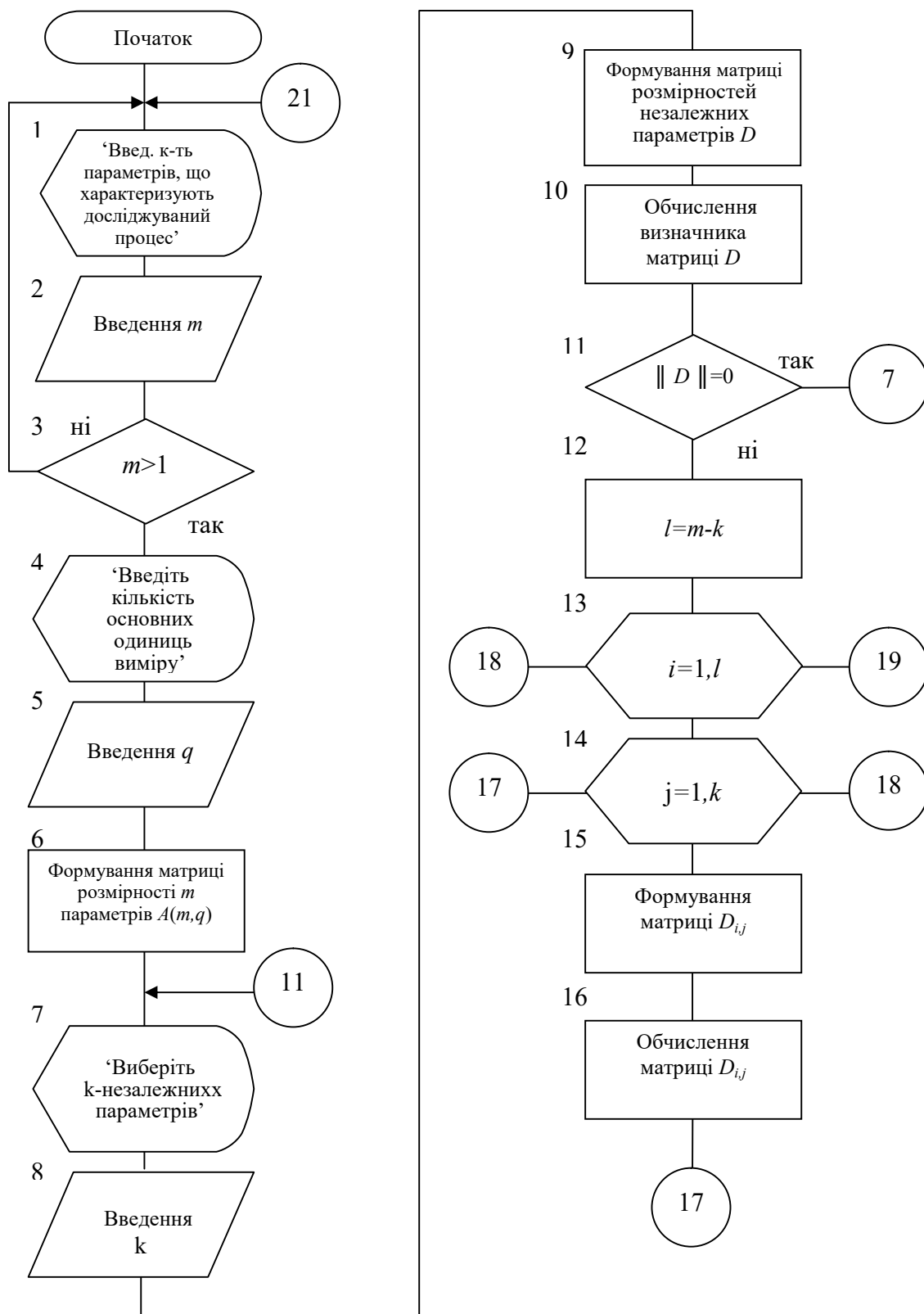
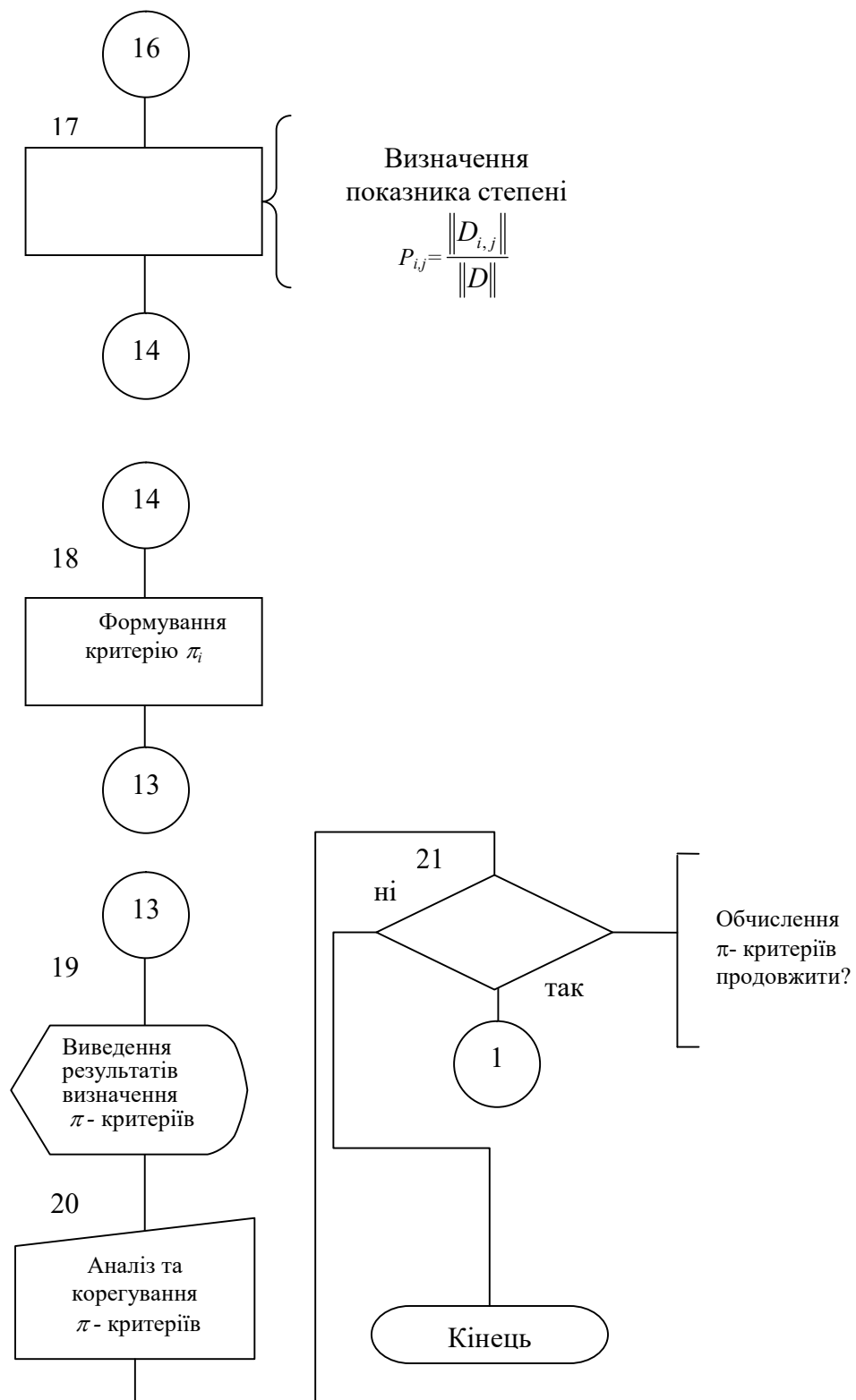


Рис. 4.3. Узагальнена схема алгоритму формування π – критеріїв.



Продовження рис. 4.3.

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

$$T = \varphi(h, H_u, H_g, \theta, V, A, f) \quad (2.28)$$

Ця залежність шляхом застосування методів теорії подібності та аналізу розмірностей перетворена до вигляду [4.44]

$$\pi_1 = \Phi(\pi_2, \pi_3, \pi_4), \quad (2.29)$$

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:

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

Звідси період стійкості різального інструмента дорівнює:

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

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

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.

4.6 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 [4.45 – 4.52].

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 фрактал як 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^2 рівна πr^2 . Нарешті, об'єм кулі радіусу r в R^3 рівний $4/3\pi r^3$. Відповідні форми в евклідовому просторі будь-якого (цілого) числа вимірювань добре відомі.

$$V_d = \Gamma(x)r^d, \quad d=1,2,3,\dots \quad (4.30)$$

де $\Gamma(x)$ – Гамма-функція:

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

Це безперервна функція позитивного аргументу, яка інтерполює факторіал як: $\Gamma(n+1) = n!, \quad n = 0,1,2,\dots$.

Перший крок в побудові теорії дробової розмірності полягає у визначенні d -міри кулі радіусу r в R^n , де d – будь-яке не від’ємне дійсне число. Це досягається розповсюдженням формули (4.30) 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):

$$B_d(A) \propto N(e)e^d.$$

Вважаючи, що, для деякого $c > 0$ маємо:

$$N(\varepsilon) = \frac{c}{\varepsilon^d} \quad (4.31)$$

Логарифмуючи ліву і праву частини, отримаємо (приблизно):

$$\log N(\varepsilon) = \log c - d \log \varepsilon \quad (4.32)$$

тобто

$$d = -\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} + \frac{\log c}{\log \varepsilon}$$

Оскільки $\log \varepsilon \rightarrow \infty$, то розмірність Мінковського $\dim_M(A)$ множини A повинна задовольняти:

$$\dim_M(A) = d = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(\varepsilon)} \quad (4.33)$$

Якщо границя існує, то вираз (4.33) визначає розмірність Мінковського множини A . Інколи також використовують термін „дробова розмірність”.

Для обчислення розмірності Мінковського d зазвичай використовують співвідношення (4.32).

$$\log N(\varepsilon) = \log c - d \log \varepsilon, \quad (4.34)$$

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 ε , необхідних для покриття фрактала. Для визначення невідомих параметрів c і d треба оцінити $N(\varepsilon)$ для декількох значень ε .

Якщо використовувати клітки тільки двох розмірів, ε_1 і ε_2 , то невідомі c і d можна визначити з системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \log N(\varepsilon_1) &= \log c - d \log \varepsilon_1 \\ \log N(\varepsilon_2) &= \log c - d \log \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (4.35)$$

Проте, враховуючи, що величини $N(\varepsilon)$ можуть бути знайдені лише приблизно, є сенс оцінити $N(\varepsilon)$ для великої кількості різних значень ε . 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 фрактала A полягає в наступному. Розбивається область, що містить A , на квадратні клітинки (двовимірний випадок) декількох розмірів. Потім підраховуємо кількість клітинок, необхідних для покриття A в кожному випадку, і підставимо набуті значення в співвідношення (4.32). 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 [4.49, 4.50]. В [4.53] показано, що процес обробки матеріалів різанням характеризується сукупністю взаємозв'язаних параметрів, що відображають різні явища, які відбуваються під час взаємодії різального інструменту з оброблюваною заготовкою. 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 [4.53 – 4.56]. 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

$$M = m_0 \cdot \left(\frac{d}{a}\right)^n, \quad (4.36)$$

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.

В [4.53] розглядається 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) $t_{нрм}$ і постійної (нижче за нерівний шар) $t_{нсм}$. Це особливо актуально в умовах чорнового проходу, коли із заготовки 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 [4.53 – 4.56]:

$$t_{нрм} = const \frac{\delta^{3-D_\Sigma}}{Lr^2}, \quad (4.37)$$

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

$$v_{60} = \frac{C_v}{HB^*}, \quad (4.38)$$

де C_v – постійна;

$$HB^* = f(D_s).$$

Як показано в [4.53], при обробці спечених металокерамічних матеріалів відхилення у величинах допустимої швидкості різання для матеріалів з близькими механічними властивостями досягають 40-50%. Це пов'язано з методичною помилкою в оцінці твердості матеріалу, тобто величиною, яка не враховує їх фрактальної структури [4.55].

Наявність фрактальної структури в оброблюваному матеріалі і в матеріалі інструменту, оскільки він є гетероструктурним композитом, обумовлює фрактальні температурно-силові закономірності процесу різання, які визначають випадковий характер зношування ріжучого інструменту на різних ділянках контакту із стружкою і оброблюваним виробом [4.55].

Порівняння стійкості інструменту при точінні матеріалів, що характеризуються різною величиною D_s свідчить про те, що процес точіння одноріднішого матеріалу супроводжується менш інтенсивним зношуванням різального інструменту [4.53]. Зростання ступеня гетерогенності структури оброблюваного матеріалу приводить до зменшення стійкості інструменту внаслідок підвищення нестабільності процесу різання через зростання ударних навантажень.

В [4.54] 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 [4.53] 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.

В [4.54] запропонована залежність для оцінки лінійної шорсткості фрактальної поверхні

$$R(x) = R(0)x^{-(1-D_p)}, \quad (4.39)$$

де x – масштабний параметр;

$R(0)$ – проекція профілю перетину поверхні на середню лінію профілю.

Як показано в [4.54], оцінивши фрактальну розмірність поверхні, 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 напрямку – фрактальної теорії різання [4.56]. Тому виникає потреба врахування складної форми поверхонь при визначенні раціональних та оптимальних умов обробки точних деталей методами фрактального аналізу [4.57, 4.58]. З цією метою розроблено схему алгоритму визначення розмірності Мінковського методом найменших квадратів, що наведено на рис. 4.4, який програмно реалізовано.

Крім того, розроблено алгоритм (рис.4.5). 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 ГОСТ 380-71 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 Marsurf PS1 фірми Mahr GmbH 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. 4.6 – 4.11.

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.

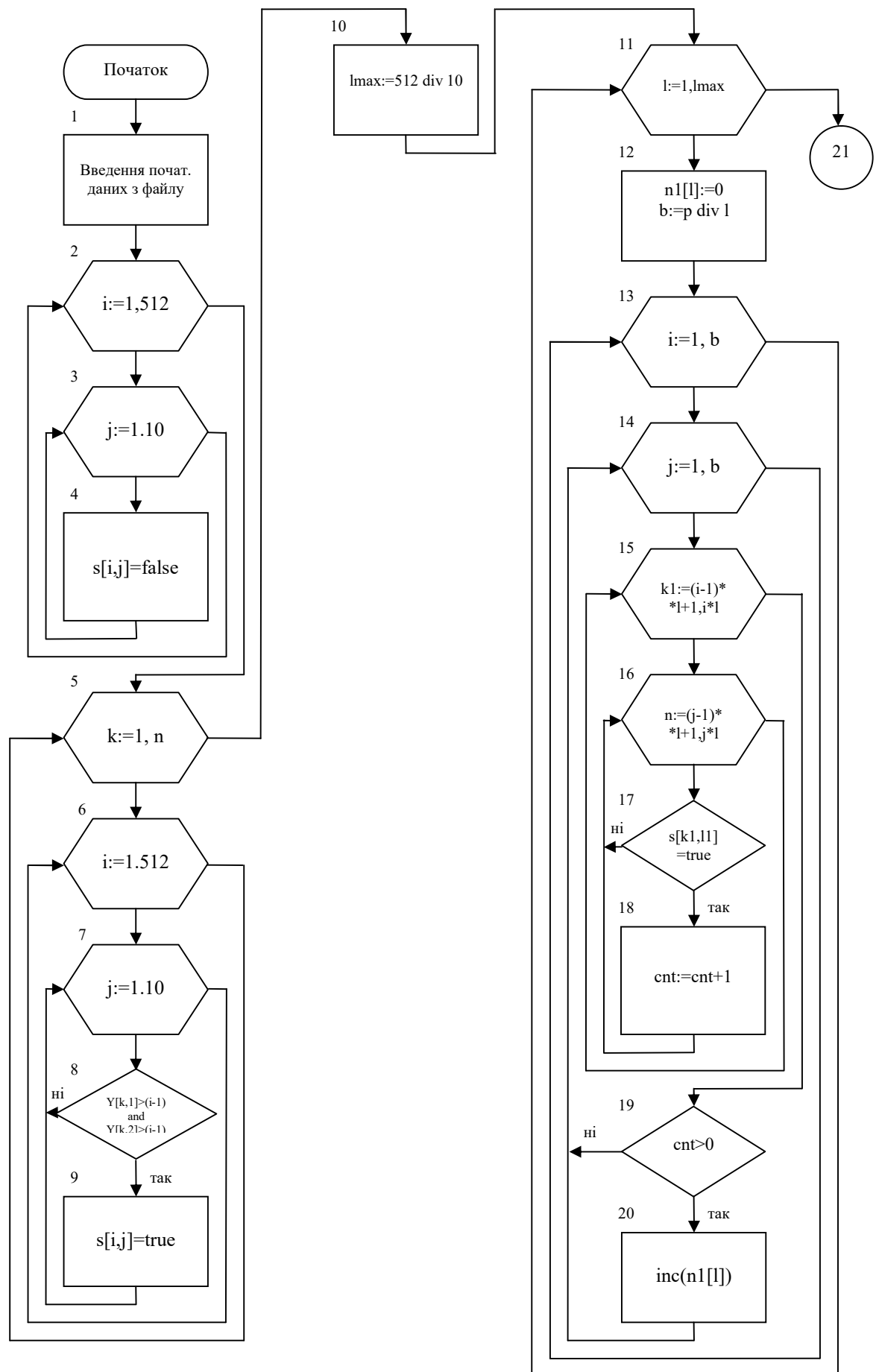
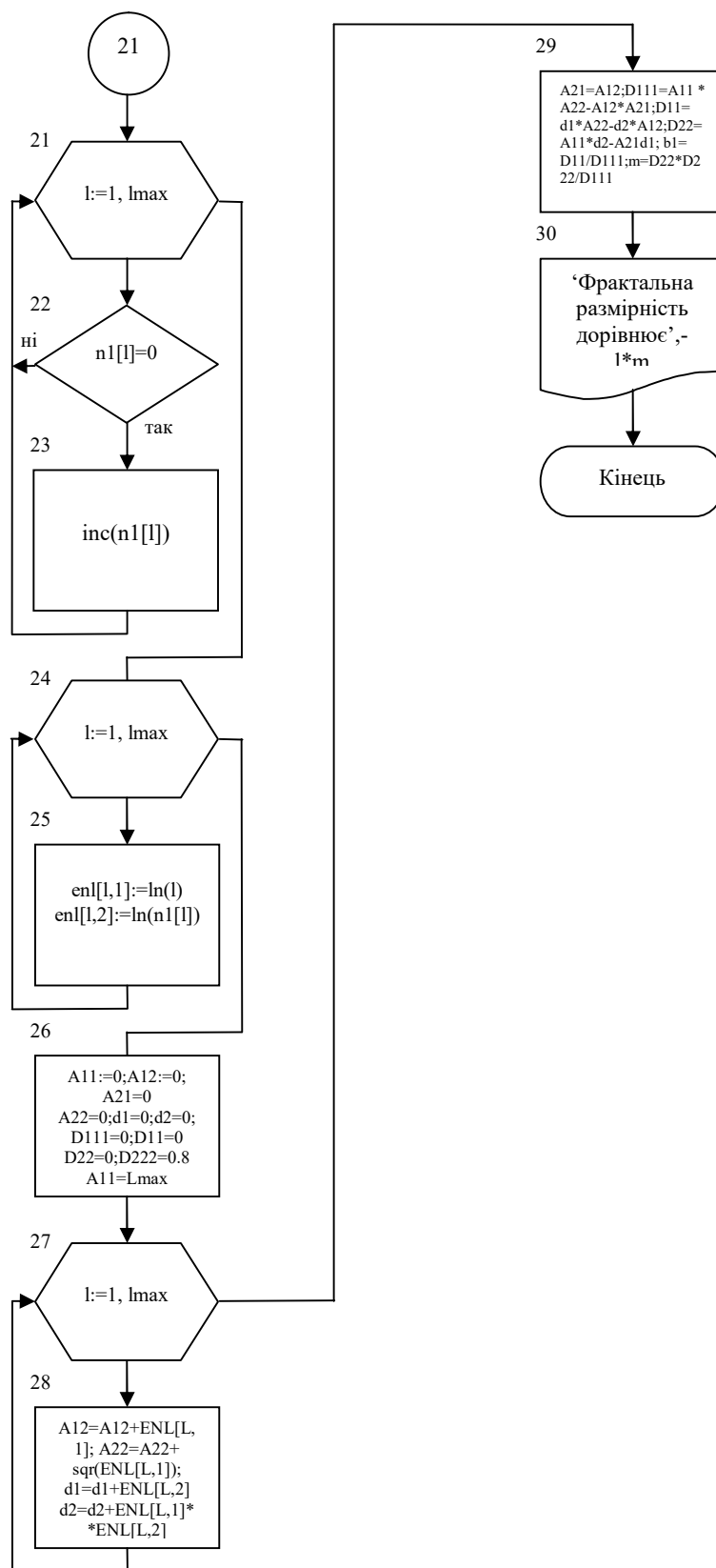


Рис.4.4. Узагальнена схема алгоритму визначення фрактальної розмірності простору за Мінковським.



Продовження рис. 4.4.

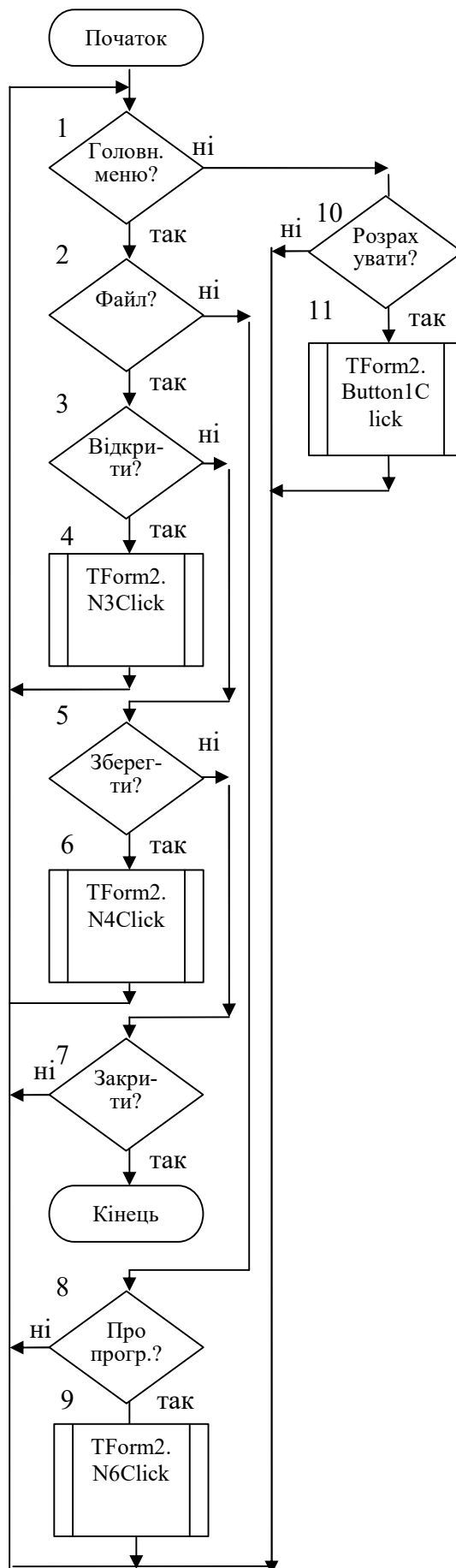


Рис. 4.5. Узагальнений алгоритм фрактального аналізу даних за Херстом.

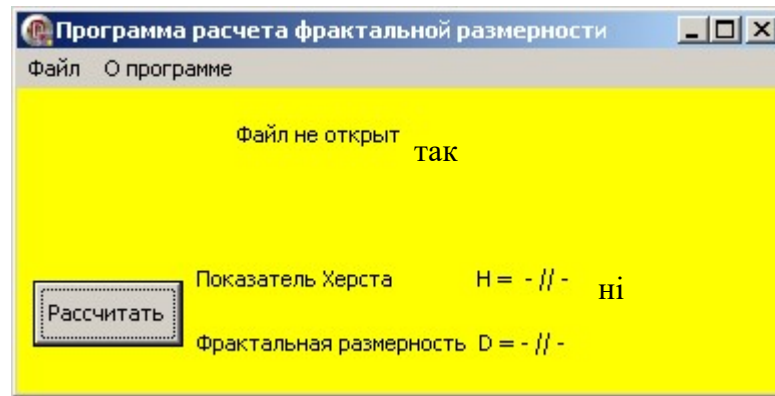


Рис. 4.6. Головне вікно програми розрахунку фрактальної розмірності.

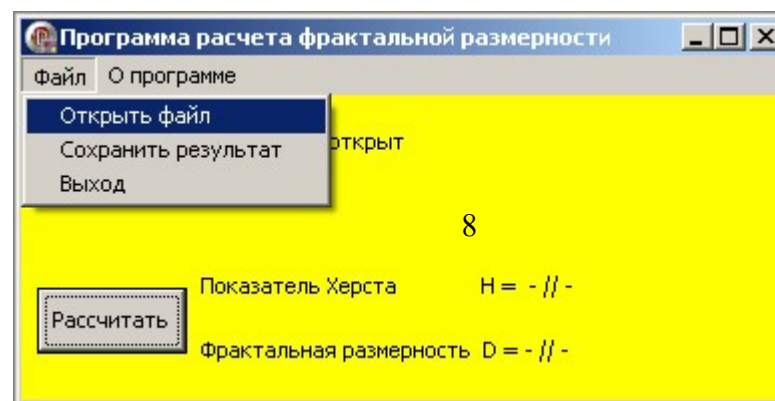


Рис. 4.7. Вікно вибору пункту „Открыть файл” меню „Файл”.

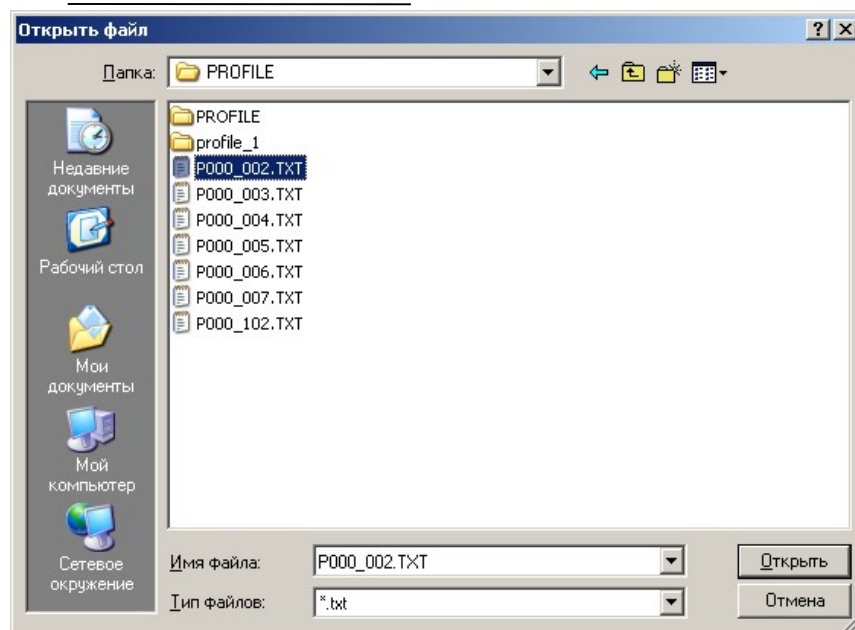


Рис. 4.8. Вікно вибору файлу з початковими даними.

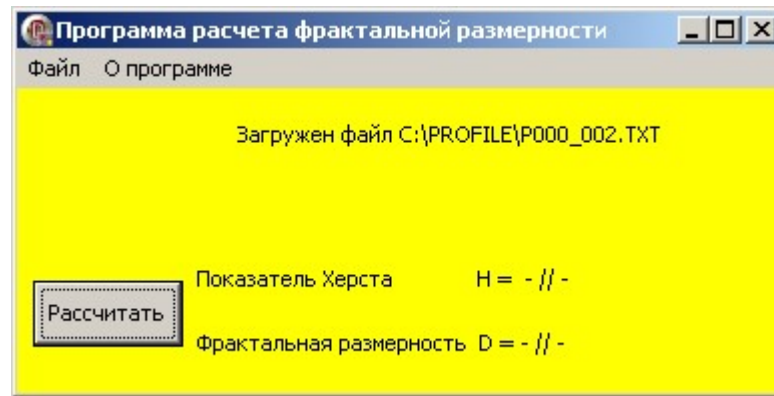


Рис. 4.9. Вікно розрахунку фрактальної розмірності.

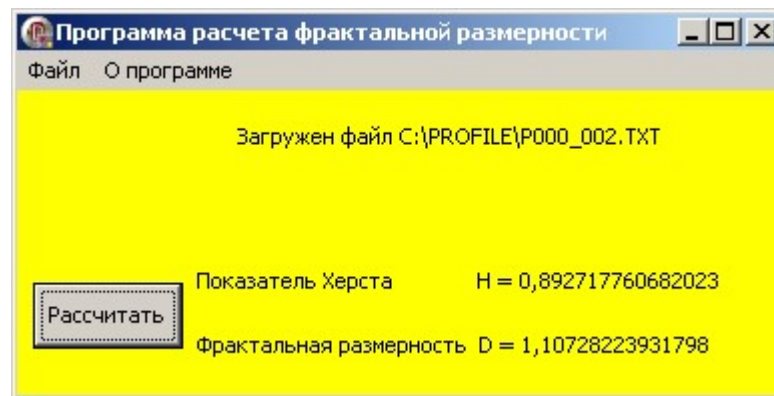


Рис. 4.10. Вікно з результатами визначення фрактальної розмірності.

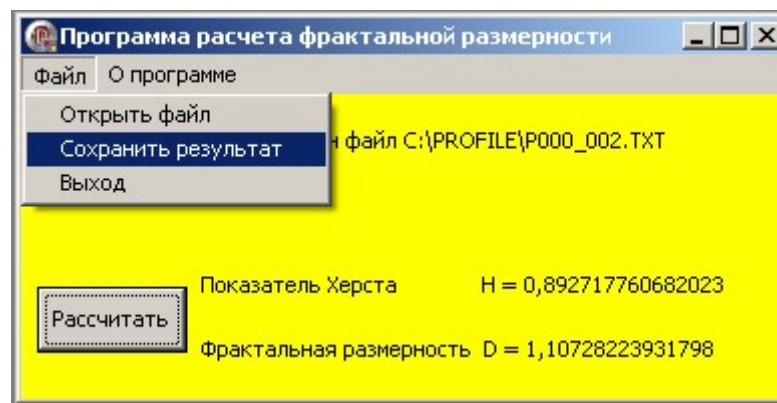


Рис. 4.11. Вікно збереження результатів розрахунків.

4.7 Индуктивные методы самоорганизации моделей

4.7.1 Синтез математических моделей за допомогою методів групового врахування аргументів

Зазвичай при моделюванні технологічних параметрів множина початкових даних надається в вигляді вектора даних $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а вихідна змінна – як $\{y(1), y(2), \dots, y(M)\}$, де M – кількість точок спостереження.

Потрібно на основі дослідних даних побудувати адекватну модель $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 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 – нестационарні.

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 [4.59 – 4.68] та використаний в роботах [4.69 – 4.72]. МГВА є методом індуктивного моделювання складних систем.

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 апіорної інформації. Відсутні відомості про об'єкт моделювання ЕОМ 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 [4.64].

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 невірної 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 ґрунтується 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 ЕОМ для одержання моделі. Крім невеликої таблиці початкових дослідних даних треба вказати критерій вибору (селекції) математичної моделі. ЕОМ 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. ЕОМ знаходить при перебиранні моделей цей мінімум і вказує єдину модель оптимальної складності [4.59 – 4.72].

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 розрізняються 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 ЕОМ. Тому однорядні алгоритми самоорганізації доцільно використовувати тільки при порівняно невеликій кількості аргументів. Схему алгоритму однорядного МГВА наведено на рис. 4.12.

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 використовуваної ЕОМ та мистецтва програміста.

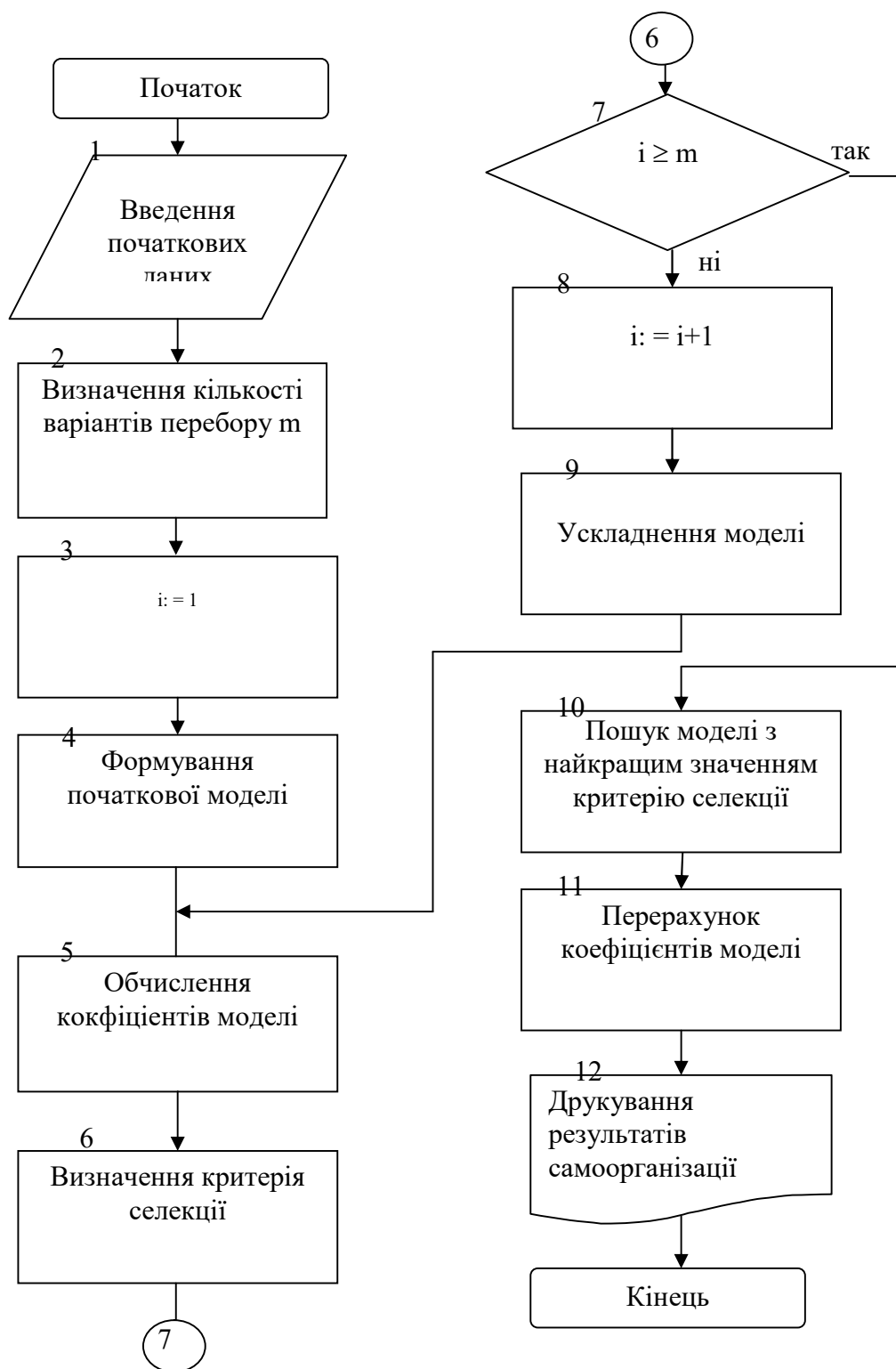


Рис. 4.12. Схема алгоритму одержання моделей методом однорядної самоорганізації.

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:

$$y_k^1 = \varphi(x_i, x_j), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \text{при} \quad i \neq j, \quad (4.40)$$

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

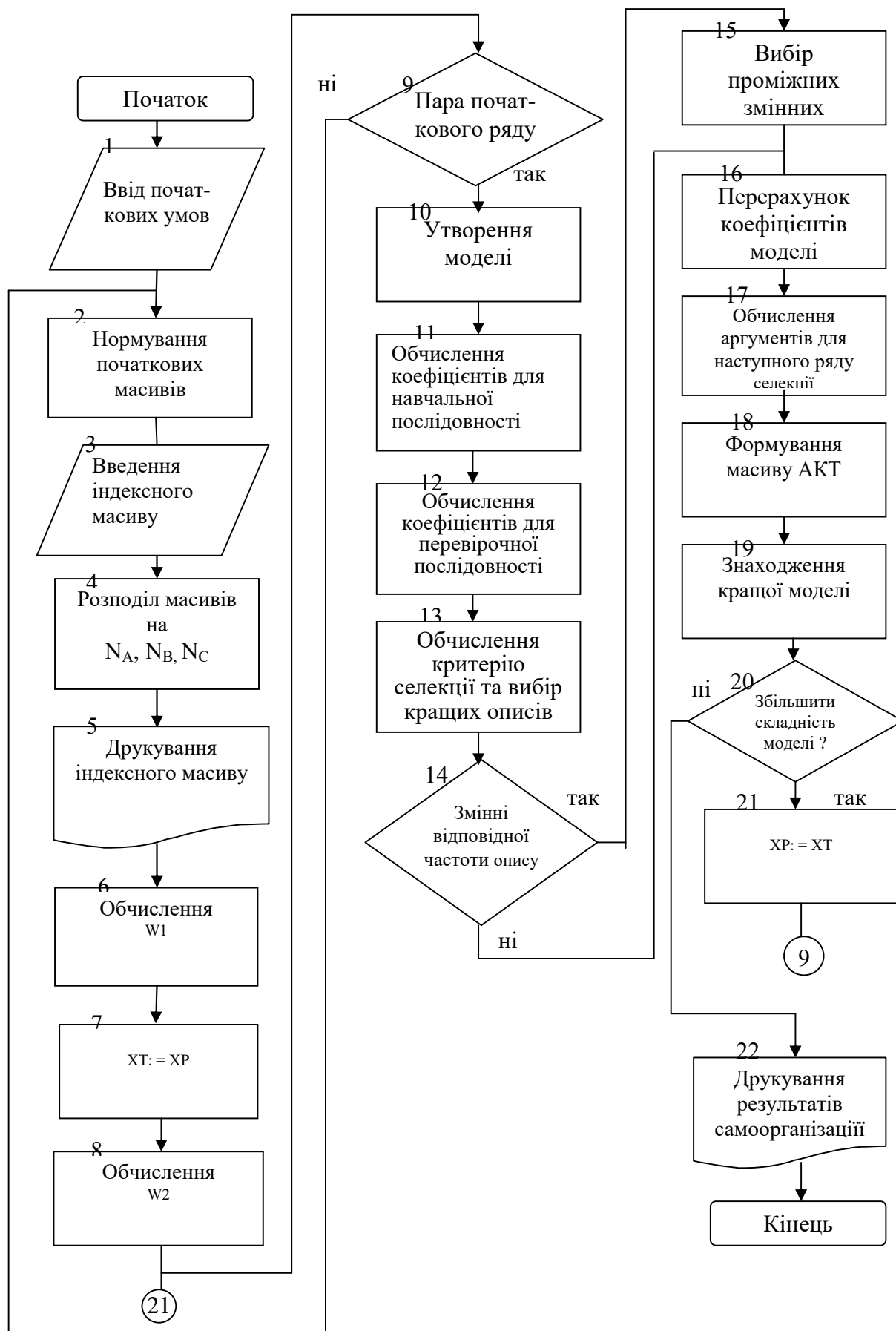
$$y_S^k = \varphi(y_i^{k-1}, y_j^{k-1}), \quad i = 1, 2, \dots, r; \quad j = 1, 2, \dots, r; \quad i \neq j. \quad (4.41)$$

В більшості випадків використовують кількість моделей, що вибираються на кожному етапі однаковою, тобто $m_1 = m_2 = \dots = m_r = F$, де F визначає вільність вибору рішень.

Багаторядні алгоритми групового врахування аргументів розрізняються виглядом опорних функцій. Частіше всього використовують алгебраїчні поліноми та різні аналоги диференціальних рівнянь. Використовують також гармонічні функції та формули Байеса. 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.

На рис.4.13 наведено узагальнену схему алгоритму багаторядної селекції з застосуванням комбінаторного перебору часткових описів. Цей алгоритм 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.

Узагальнену схему алгоритму самоорганізації математичних моделей з пороговим самовідбором наведено на рис. 4.14. 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



4.13. Схема алгоритму багаторядної селекції з пороговим само відбором.

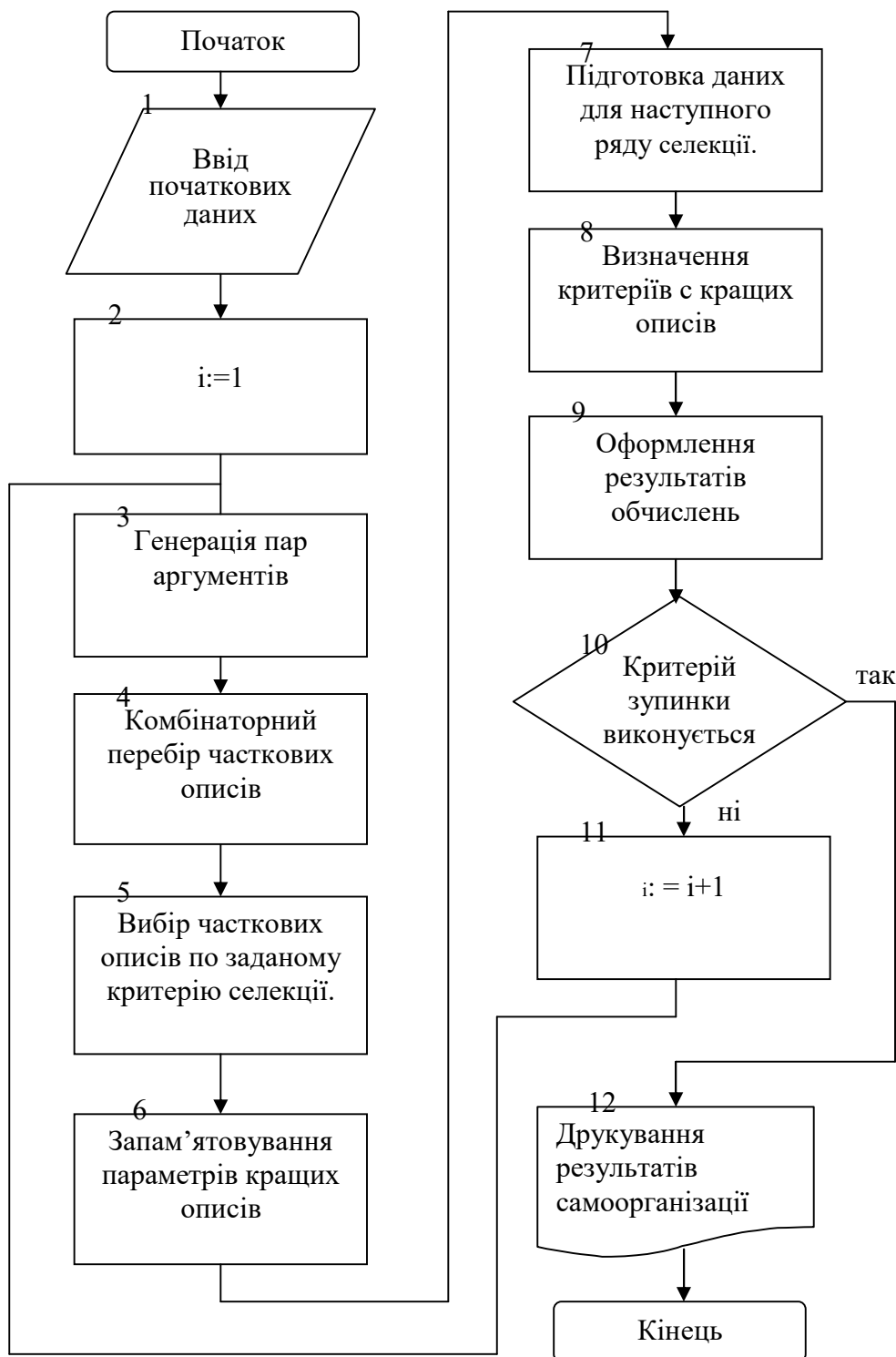


Рис.4.14. Схема алгоритму одержання моделей методом їх багаторядної селекції з комбінаторним перебором часткових описів.

за значенням вирахованого критерію селекції відбирається f кращих моделей. В 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 ϵ , 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 перевіркою 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 самовідбором 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: $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $\varphi = 10^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 1$ 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:

$$T = 1.089435372485 + 0.000000000001 C_6 + 0.769697986466 C_2 + 0.000000000001 C_6 C_2, \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} \text{де } C_6 &= 1.2671044485 - 0.069158877 D_1 + 0.277018428 D_2 + 0.093129389 D_1 D_2; \\ C_2 &= 1.29045427 - 0.164052454 D_5 + 0.467286992 D_6 + 0.065810678 D_3 D_6; \\ D_1 &= 1.206697396 + 0.911622389 (1/V) - 2.323033584 (1/t) + \\ &+ 797.192586989 (1/V)(1/t); \\ D_2 &= 1.322925655 - 0.18516914 (1/s) + 5.4492744037 (1/t) + \\ &+ 0.103515648 (1/s)(1/t); \\ D_5 &= -3.050483578 - 0.001092397 V + 1041.329754278 (1/V); \end{aligned}$$

$$D_6=0.924656261+0.600523631 s+4.797505727 t-2.21292332 s t.$$

4.7.2 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 [4.73 – 4.78] 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. Питання використання нечіткої інформації також розглянуто в [4.79 – 4.81].

Для побудови часткової моделі НМГВА використано лінійну інтервальну регресійну модель [4.73, 4.78], що визначена як:

$$Y = B_1 z_1 + B_2 z_2 + \dots + B_n z_n \quad (4.43)$$

де z_i – деякі відомі змінні;

B_i – інтервали, які можна задати нечіткими числами і записати в вигляді центра α_i ширини c_i :

$$B_i = (\alpha_i, c_i) . \quad (4.44)$$

Виходячи з цього, вихідну величину Y можна розрахувати як:

$$Y = \left(\sum \alpha_i z_i \sum C_i | z_i | \right) \quad (4.45)$$

Відношення вкладеності двох інтервалів B_i і B_j ($B_i \subset B_j$) можна задати такими нерівностями: $\alpha_j - c_j \leq \alpha_i - c_i$, $\alpha_j + c_j \geq \alpha_i + c_i$.

У нашому випадку змінні z_i пов'язані зі змінними x_i і x_j для відповідної часткової моделі НМГВА як:

$$z_1 = 1, z_2 = x_i, z_3 = x_j, z_4 = x_1^2, \dots, z_{n-1} = x_i \cdot x_j^{r-1}, z_n = x_j^r \quad (4.46)$$

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, \dots, x_n, y) треба визначити. При цьому $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{iM})$ і

$y=(y_1, \dots, y_M)$ – вхідні і вихідні вектори точок спостереження. Тоді оціночна лінійна інтервальна модель для часткової моделі НМГВА матиме такий вигляд:

$$Y_i^* = A_{00}^* + A_{10}^* x_i + A_{11}^* x_j + A_{20}^* x_i^2 + \dots + A_{rr-1}^* x_i x_j^{r-1} + A_{rr}^* x_j^2 \quad (4.47)$$

Побудова оціночної моделі здійснюється з урахуванням наступних вимог:

1) задані значення y_j , що спостерігаються, включаються в оціночний інтервал Y_j^* ;

2) ширина оціночного інтервалу повинна бути мінімальною.

Ці вимоги можна звести до задачі лінійного програмування в такому вигляді (для k -тої точки спостереження):

$$\min(c_0 + c_1 \cdot |X_{ki}| + \dots + c_{C_{r+1}^2-1} \cdot |X_{ki} \cdot X_{kj}^{r-1}| + c_{C_{r+1}^2} \cdot |X_{kj}^r|); \quad (4.48)$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + \dots + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r - (c_0 + c_1 \cdot |X_{ki}| + \dots + c_{C_{r+1}^2} \cdot |X_{kj}^r|) \leq Y_k; \quad (4.49)$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + \dots + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r + (c_0 + c_1 \cdot |X_{ki}| + \dots + c_{C_{r+1}^2} \cdot |X_{kj}^r|) \geq Y_k; \quad (4.50)$$

$$c_p \geq 0, p = \overline{1, C_{r+1}^2}$$

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):

$$\min\left(c_0 \cdot M + c_1 \cdot \sum_{k=1}^M |X_{ki}| + \dots + c_{C_{r+1}^2-1} \cdot \sum_{k=1}^M |X_{ki} \cdot X_{kj}^{r-1}| + c_{C_{r+1}^2} \cdot \sum_{k=1}^M |X_{kj}^r|\right); \quad (4.51)$$

при обмеженнях

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + \dots + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r - (c_0 + c_1 \cdot |X_{ki}| + \dots + c_{C_{r+1}^2} \cdot |X_{kj}^r|) \leq Y_k; \quad (4.52)$$

$$\alpha_0 + \alpha_1 \cdot X_{ki} + \dots + \alpha_{C_{r+1}^2} \cdot X_{kj}^r + (c_0 + c_1 \cdot |X_{ki}| + \dots + c_{C_{r+1}^2} \cdot |X_{kj}^r|) \geq Y_k; \quad (4.53)$$

$$k = \overline{1, M}; \quad c_p \geq 0, \quad p = \overline{1, C_{r+1}^2},$$

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 , $i=1,2,\dots,C_{r+1}^2$, 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:

$$\max \left(\sum_{k=1}^M Y_k \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M Y_k \delta_k \right); \quad (4.54)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^M \delta_k + \sum_{k=1}^M \delta_{k+M} &\leq M \\ \sum_{k=1}^M |X_{ki}| \delta_k + \sum_{k=1}^M |X_{ki}| \delta_{k+M} &\leq \sum_{k=1}^M |X_{ki}| \\ &\dots \\ \sum_{k=1}^M |X_{kj}^2| \delta_k + \sum_{k=1}^M |X_{kj}^2| \delta_{k+M} &\leq \sum_{k=1}^M |X_{kj}^2| \end{aligned} \right\} \quad (4.55)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^M \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M \delta_k &= 0 \\ \sum_{k=1}^M X_{ki} \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M X_{ki} \delta_k &= 0 \\ &\dots \\ \sum_{k=1}^M X_{kj}^2 \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M X_{kj}^2 \delta_k &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.56)$$

$$\delta_k \geq 0; \quad k = \overline{1, 2M}$$

Розв'язавши двоїсту задачу симплекс-методом і одержавши оптимальні значення двоїстих змінних, зможемо знайти й оптимальні значення необхідних змінних α_i , $i=1,2,\dots,C_{r+1}^2$, а разом з цим і визначити математичну модель у вигляді залежності (4.47).

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

$$Y_{ij}^{k+1} = f(Y_i^k, Y_j^k),$$

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:

$$-\varepsilon < N_{cm}^{k+1} - N_{cm}^k < \varepsilon. \quad (4.57)$$

При генерації моделей може виникнути явище індуктиву, 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

$$Y_{ij}^{k+1} = f(Y_i^{k-1}, Y_j^k)$$

Узагальнену схему алгоритму нечіткого МГВА наведено на рис. 4.15. Програмна реалізація алгоритму нечіткого МГВА виконана в системі програмування Borland C++ Builder. Програма розроблена як система моделювання. Вона має інтегрований інтерфейс (рис. 4.16) та передбачає уніфікацію обробки статистичних даних [4.82 – 4.87].

4.7.3 Використання нечіткого методу групового врахування аргументів для моделювання та прогнозування технологічних параметрів

Приклад 1. *Моделювання та прогнозування величини зносу різального інструменту по задній грані h .*

В результаті проведення експериментальних досліджень процесу точіння деталей із сталей 45, 12X18H9T, 40XH2MA, 07X16H6 та 15X16H2AMШ 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 4.2.

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 :

$$\begin{aligned} h = & 4,53 + 0,717 \cdot \text{Mat} \cdot \text{Ins} + 0,07186 \cdot \text{Ins} + 0,0148 \cdot \text{Mat} \cdot \text{Ins}^2 + 2,426 \cdot \text{Mat} + 0,2576 \cdot \text{Mat} \cdot \\ & \cdot (\text{Ins}/(V \cdot t)) + 0,001613 \cdot (V \cdot S)/t + 0,003855 \cdot ((V \cdot S)/t) \cdot ((\text{Ins} \cdot t)/S) + 0,000153 \cdot ((V \cdot S)/t)^2 + \\ & + 0,00007198 \cdot ((\text{Ins} \cdot t)/S)^2 + 0,0161 \cdot \text{Mat} \cdot ((V \cdot S)/t) + 0,0385 \cdot \text{Mat} \cdot ((V \cdot S)/t) \cdot ((\text{Ins} \cdot t)/S) + \\ & + 0,001526 \cdot \text{Mat} \cdot ((V \cdot S)/t)^2 + 0,00072 \cdot \text{Mat} \cdot ((\text{Ins} \cdot t)/S)^2 + 0,0017 \cdot \text{Mat} \cdot (\text{Ins}/(V \cdot t)) \cdot ((V \cdot S)/t) + \\ & + 0,0041 \cdot \text{Mat} \cdot (\text{Ins}/(V \cdot t)) \cdot ((V \cdot S)/t) \cdot ((\text{Ins} \cdot t)/S) + 0,000162 \cdot \text{Mat} \cdot (\text{Ins}/(V \cdot t)) \cdot ((V \cdot S)/t)^2 + \\ & + 0,00007635 \cdot \text{Mat} \cdot (\text{Ins}/(V \cdot t)) \cdot ((\text{Ins} \cdot t)/S)^2, \end{aligned}$$

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).

З метою порівняння звичайного методу групового врахування аргументів та нечіткого МГВА виконано прогнозування величини зносу різального інструменту за дев'ятьма дослідями.

Таблиця 4.2.

Результати експериментальних досліджень

№ 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	0,07	0,8	29	3
2	3	2	75,36		0,5	8	2,7
3	1	3	94,2		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	0,11	0,5	4	23
7	4	3	75,36		1	56	5
8	3	1	94,2		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	0,14	1	26	7,5
12	5	1	75,36		0,6	4	4
13	4	5	94,2		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	0,21	0,6	53	10,5
17	1	4	75,36		0,7	4	16
18	2	2	94,2		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	0,28	0,7	15	12
22	2	5	75,36		0,8	11	13,7
23	5	4	94,2		0,5	83	10
24	1	1	141,3		1	35	7
25	3	3	188,4		0,6	220	4

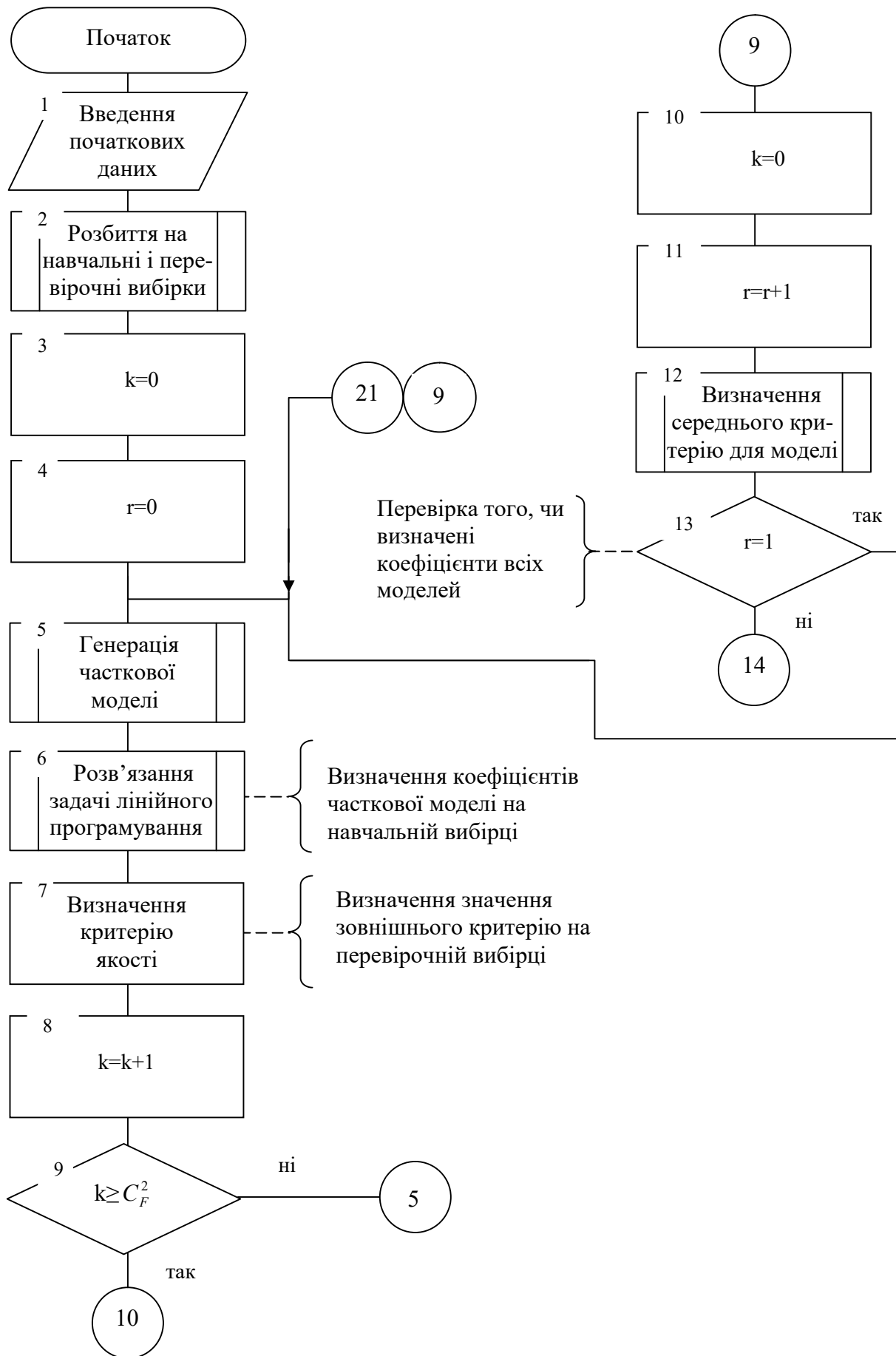
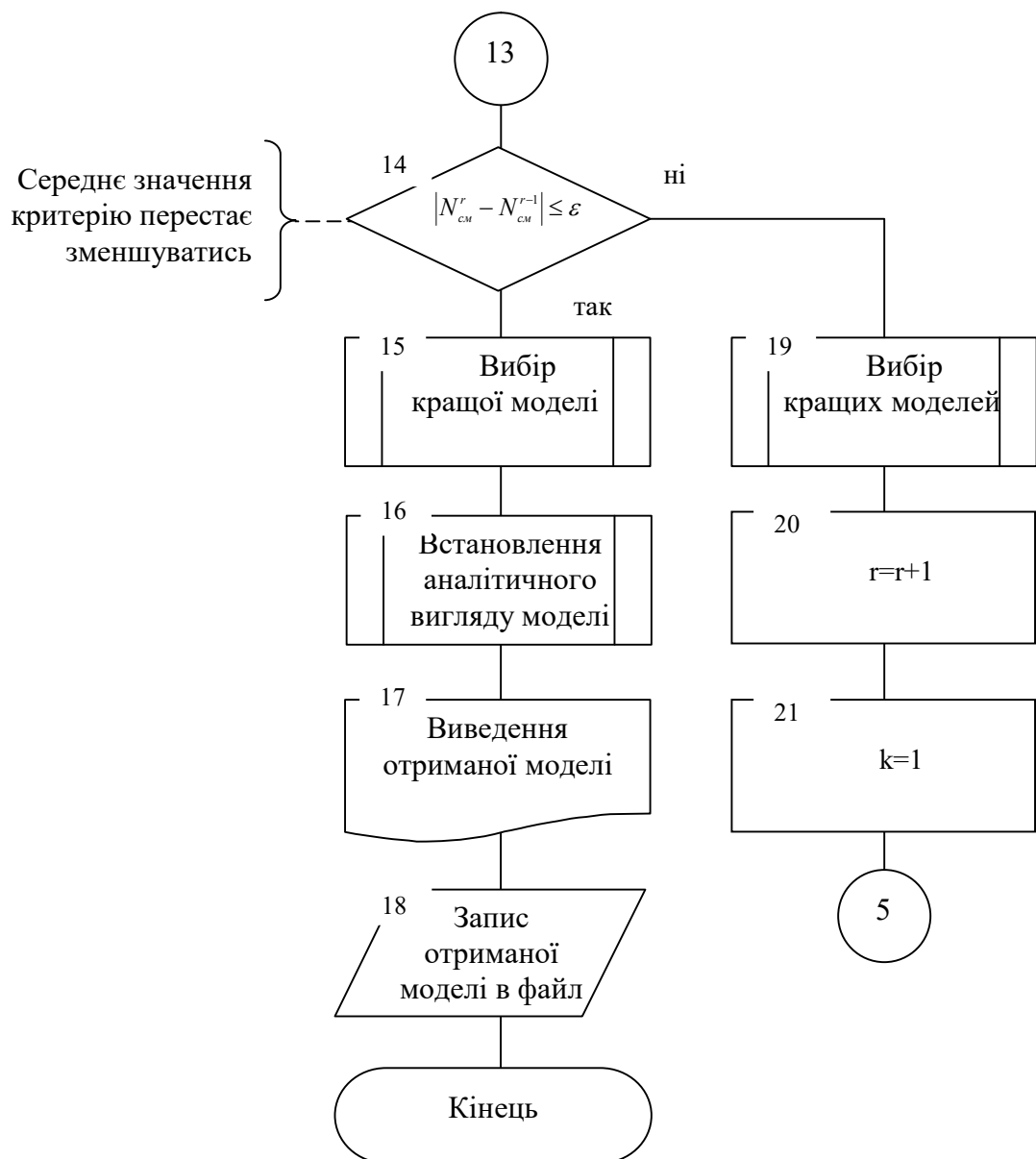


Рис. 4.15. Узагальнена схема алгоритму нечіткого МГВА.



Продовження рис. 4.15.

Система моделювання

Файл Таблица Методы Операции

Данные Результат

	Mat	Ins	V	S	t	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
18	3	5	94,2	0,21	0,8	10
19	4	1	141,3	0,21	0,9	2
20	5	2	188,4	0,21	1	14
21	1	3	47,1	0,21	0,5	4
22	2	4	75,36	0,21	0,6	26
23	3	5	94,2	0,21	0,7	116
24	4	1	141,3	0,21	0,8	18
25	5	2	188,4	0,21	0,9	53
26	1	3	47,1	0,21	1	4
27	2	4	75,36	0,21	0,5	26
28	3	5	94,2	0,21	0,6	116
29	4	1	141,3	0,21	0,7	18
30	5	2	188,4	0,21	0,8	53
31	1	3	47,1	0,21	0,9	4
32	2	4	75,36	0,21	1	26
33	3	5	94,2	0,21	0,5	116
34	4	1	141,3	0,21	0,6	18
35	5	2	188,4	0,21	0,7	53
36	1	3	47,1	0,21	0,8	4
37	2	4	75,36	0,21	0,9	26
38	3	5	94,2	0,21	1	116
39	4	1	141,3	0,21	0,5	18
40	5	2	188,4	0,21	0,6	53
41	1	3	47,1	0,21	0,7	4
42	2	4	75,36	0,21	0,8	26
43	3	5	94,2	0,21	0,9	116
44	4	1	141,3	0,21	1	18
45	5	2	188,4	0,21	0,5	53
46	1	3	47,1	0,21	0,6	4
47	2	4	75,36	0,21	0,7	26
48	3	5	94,2	0,21	0,8	116
49	4	1	141,3	0,21	0,9	18
50	5	2	188,4	0,21	1	53

D:\Мои документы\Orest\Диплом\Дан\h_old_nesort.txt

Рис. 4.16. Загальний вигляд інтерфейсу системи моделювання.

Порівняння результатів прогнозування класичним МГВА та нечітким МГВА, які наведені в таблицях 4.3 і 4.4 та на рис. 4.17 і 4.18, 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 4.3.

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 4.4.

Прогнозування величини зносу різального інструменту h нечітким МГВА

№ досліджу	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

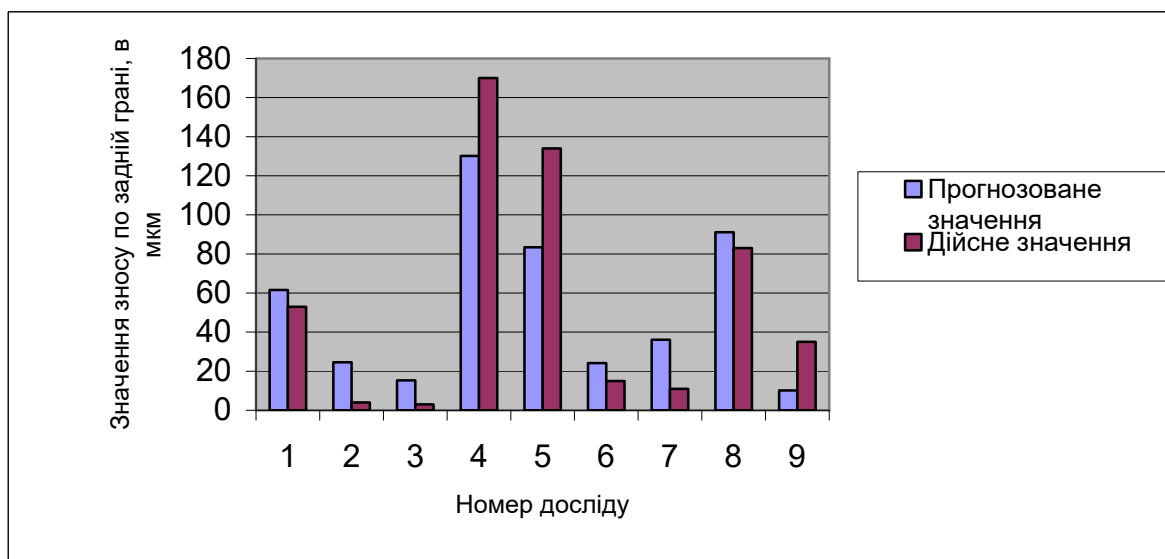


Рис. 4.17. Результати прогнозування величини зносу інструмента h класичним МГВА.

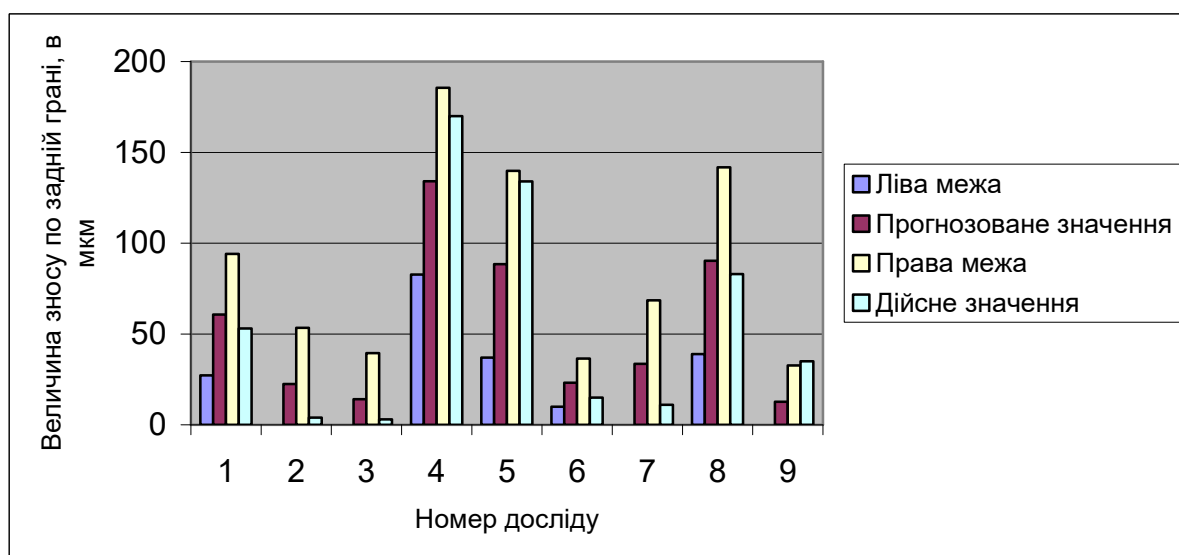


Рис. 4.18. Результати прогнозування величини зносу інструменту h нечітким МГВА.

Приклад 2. *Моделювання та прогнозування величини шорсткості обробленої поверхні при точінні.*

Умови проведення експериментальних досліджень конструкційних матеріалів та відповідні значення шорсткості обробленої поверхні надано в таблиці 4.2.

В результаті обробки експериментальних даних за допомогою розробленої системи моделювання за нечітким МГВА отримано таку функціональну залежність Rz від вхідних параметрів:

$$Rz=2,9826+6,2835 \cdot S+0,131 \cdot Ins^2+0,003 \cdot S^4+10,759 \cdot S^2+0,1587 \cdot Ins+0,01125 \cdot Ins^3+ \\ +1,155 \cdot Ins \cdot S+0,000123 \cdot Ins^5+0,16693 \cdot Ins^2 \cdot S+6,957476 \cdot Ins^6+0,012 \cdot Ins^3 \cdot S+ \\ +0,0004 \cdot Ins^4 \cdot S+2,42 \cdot 10^{-7} \cdot Ins^7+4,08 \cdot 10^{-9} \cdot Ins^8.$$

Виконано прогнозування значень шорсткості оброблених поверхонь як класичним методом групового врахування аргументів, так і за допомогою нечіткого МГВА. Результати прогнозування надано в таблицях 4.5 та 4.6. Порівнюючи результати прогнозування обома методами, видно, що нечіткий метод групового врахування аргументів має менше середньоквадратичне відхилення від реальних значень шорсткості ніж класичний метод.

Таблиця 4.5.

Результати прогнозування величини шорсткості обробленої поверхні класичним МГВА

Прогнозоване значення	Дійсне значення	Відхилення
9,66906597	10,5	0,830934
14,31532625	16	1,684674
6,311650807	3,6	2,711651
12,81125143	13	0,188749
2,818900645	3,6	0,781099
10,40169695	12	1,598303
15,86391667	13,7	2,163917
11,39733586	10	1,397336
7,103540493	7	0,10354
9,66906597	10,5	0,830934
	Середньо квадратичне відхилення	1,517591

Приклад 3. Моделювання сил різання [4.87].

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 P18 діаметром $D = 16$ мм та кількістю зубців $z = 3$. Режими проведених досліджень варіювались в таких межах: швидкість різання $V = 50 - 200$ м/хв, подача $s_m = 50 \dots 200$ мм/хв; глибина фрезерування $t = 0,5 \dots 1$ мм при ширині фрезерування $B = 1 \dots 3$ мм; кількість обертів $n = 1120 \dots 2240$ об/хв.)

Обробка результатів дослідження з метою отримання математичної моделі складових сил різання здійснювалась нечітким методом групового аргументів за допомогою системи моделювання.

Таблиця 4.6.

Прогнозування величини шорсткості обробленої поверхні нечітким 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
			Середньо квадратичне відхилення	1,365832

В результаті цього отримано залежності сили різання R від режимів різання, які представлені верхньою граничною межею сили R_v , нижньою межею R_n та середнім значенням діапазону R_c :

$$R_v = 1,29 + 0,9616 \times B + 0,44 \times B \times t + 0,094365 \times s_z \times V + 7,491 \times 10^{-6} \times V^2 + 0,2934 \times B \times s_z \times V + 2,33 \times 10^{-5} \times B \times V^2 + 0,13445 \times B \times t \times s_z \times V + 1,067 \times 10^{-5} \times B \times t \times V^2 + 0,06977 \times B^2 + 0,06394 \times B^2 \times t + 0,01465 \times B^2 \times t^2 + 5,6287 \times 10^{-5} \times s_z^2 \times V^2 + 8,937 \times 10^{-9} \times s_z \times V^3 + 3,5474 \times 10^{-13} \times V^4;$$

$$R_c = 0,4765 + 0,96158 \times B + 0,4406 \times B \times t + 0,09436 \times s_z \times V + 7,49136 \times 10^{-6} \times V^2 + 0,29339 \times B \times s_z \times V + 2,329 \times 10^{-5} \times B \times V^2 + 0,13445 \times B \times t \times s_z \times V + 1,06733 \times 10^{-5} \times B \times t \times V^2 + 0,06977 \times B^2 + 0,063944 \times B^2 \times t + 0,014651 \times B^2 \times t^2 + 5,6287 \times 10^{-5} \times s_z^2 \times V^2 + 8,937 \times 10^{-9} \times s_z \times V^3 + 3,5474 \times 10^{-13} \times V^4;$$

$$R_n = -0,337 + 0,96158 \times B + 0,4406 \times B \times t + 0,0943 \times s_z \times V + 7,49 \times 10^{-6} \times V^2 + 0,2934 \times B \times s_z \times V + 2,3292 \times 10^{-5} \times B \times V^2 + 0,13445 \times B \times t \times s_z \times V + 1,06733 \times 10^{-5} \times B \times t \times V^2 + 0,06977 \times B^2 + 0,063944 \times B^2 \times t + 0,01465 \times B^2 \times t^2 + 5,6287 \times 10^{-5} \times s_z^2 \times V^2 + 8,937 \times 10^{-9} \times s_z \times V^3 + 3,5474 \times 10^{-13} \times V^4,$$

де V – швидкість різання;

s_z – подача на зуб;
 t – глибина різання;
 B – ширина фрезерування.

Приклад 4. Моделювання стійкості різального інструменту [4.85].

При цьому виконували токарну обробку титанового сплаву BT2 прохідними різцями з механічним кріпленням пластинок з твердих сплавів BK2, BK3, BK4, BK6, BK6M, BK8, T5K10 та T15K6. Геометричні параметри різальної крайки інструменту вибрані згідно з рекомендаціями НДІАТ, а саме: $\gamma=0^0$; $\alpha=\alpha_l=10^0$; $\varphi=45^0$; $\varphi_l=10^0$; $\lambda=0^0$; $r=1$ 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 BT2:

$$T_u=2.4357+120.9 \cdot (1/mat) \cdot (1/V)+41.76784 \cdot (1/V)^2+2957.69 \cdot (1/mat)^2 \cdot (1/V)^2+ \\ +2043.49 \cdot (1/mat) \cdot (1/V)^3+352.96734 \cdot (1/V)^4+0.0014629 \cdot ((V \cdot s)/mat)+ \\ +1.9958 \cdot 10^{-6} \cdot ((V \cdot s)/mat)^2+0.06 \cdot (1/mat) \cdot (1/V) \cdot ((V \cdot s)/mat)+29832.23 \cdot (1/mat)^3 \cdot (1/V)^3+ \\ +30917.04 \cdot (1/mat)^2 \cdot (1/V)^4++10680.43 \cdot (1/mat) \cdot (1/V)^5+8.19 \cdot 10^{-5} \cdot (1/mat) \cdot (1/V) \cdot \\ \cdot ((V \cdot s)/mat)^2+0.02074 \cdot (1/V)^2 \cdot ((V \cdot s)/mat)+1229.86 \cdot (1/V)^6+ \\ +2.829 \cdot 10^{-5} \cdot (1/V)^2 \cdot ((V \cdot s)/mat)^2+1.0419 \cdot (1/mat)^2 \cdot (1/V)^2 \cdot ((V \cdot s)/mat)+ \\ +258844.19 \cdot (1/mat)^4 \cdot (1/V)^4+357675.59 \cdot (1/mat)^3 \cdot (1/V)^5+185340.98 \cdot (1/mat)^2 \cdot (1/V)^6+ \\ +0.00142 \cdot (1/mat)^2 \cdot (1/V)^2 \cdot ((V \cdot s)/mat)^2+0.71986 \cdot (1/mat) \cdot (1/V)^3 \cdot ((V \cdot s)/mat)+ \\ +42684.58 \cdot (1/mat) \cdot (1/V)^7+0.000982 \cdot (1/mat) \cdot (1/V)^3 \cdot ((V \cdot s)/mat)^2+ \\ +0.124 \cdot (1/V)^4 \cdot ((V \cdot s)/mat)+3686.3959 \cdot (1/V)^8+0.000169 \cdot (1/V)^4 \cdot ((V \cdot s)/mat)^2,$$

де mat – код матеріалу різальної пластинки різця: 1 – BK2; 2 – BK3; 3 – BK4; 4 – BK6; 5 – BK6M; 6 – BK8; 7 – T5K10; 8 – T15K6.

Отримана залежність дозволяє вибрати найбільш ефективний матеріал різальної пластинки та оптимальні режими точіння сплаву BT2 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.

4.8 Моделювання технологічних параметрів шляхом використання штучних нейронних мереж

4.8.1 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 [4.88 – 4.115]. Це автоматизація процесів розпізнавання образів, адаптивне управління, апроксимація, прогнозування, створення експертних систем, організація асоціативної пам'яті і багато інших можливостей використання.

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 – однонаправлених 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 синаптичного зв'язку або її вагою w_i , яка за фізичним сенсом еквівалентна електричній провідності.

Поточний стан нейрона визначається як зважена сума його входів:

$$s = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \quad (4.58)$$

Вихід нейрона є функцією його стану:

$$y = f(s) \quad (4.59)$$

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 [4.94]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}} \quad (4.60)$$

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, задавши 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

$$W^{(\Sigma)} = W^{(1)} \cdot W^{(2)} \cdot \dots \cdot W^{(p)} \quad (4.61)$$

тобто фактично така p -шарова НМ еквівалентна одношаровій НМ з ваговою матрицею єдиного шару $W^{(\Sigma)}$:

$$Y = XW^{(\Sigma)} \quad (4.62)$$

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 (4.58), проте в деяких випадках НМ корисно ввести інший запис, наприклад:

$$s = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot w_i \quad (4.63)$$

або навіть

$$s = \sum_{i=1}^n x_i \cdot x_{((i+1) \bmod n)} \cdot w_i \quad (4.64)$$

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)

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot w_{ik} = T_k, k=1, \dots, m \quad (4.65)$$

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:

$$\delta = Y_t - Y$$

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, $0 < \nu < 1$;

i – номер входу;

j – номер нейрона в шарі.

Вочевидь, якщо $Y_l > Y$ вагові коефіцієнти будуть збільшені то тим самим вони зменшать похибку. Інакше вони будуть зменшені, і Y теж зменшиться, наближаючись до Y_l .

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, які наведено в Додатку В. 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.

4.8.2 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.

Прогнозування технологічних параметрів. Узагальнений алгоритм прогнозування за допомогою штучних нейронних мереж модуля Neural Network Toolbox пакету Matlab наведено на рис. 4.19.

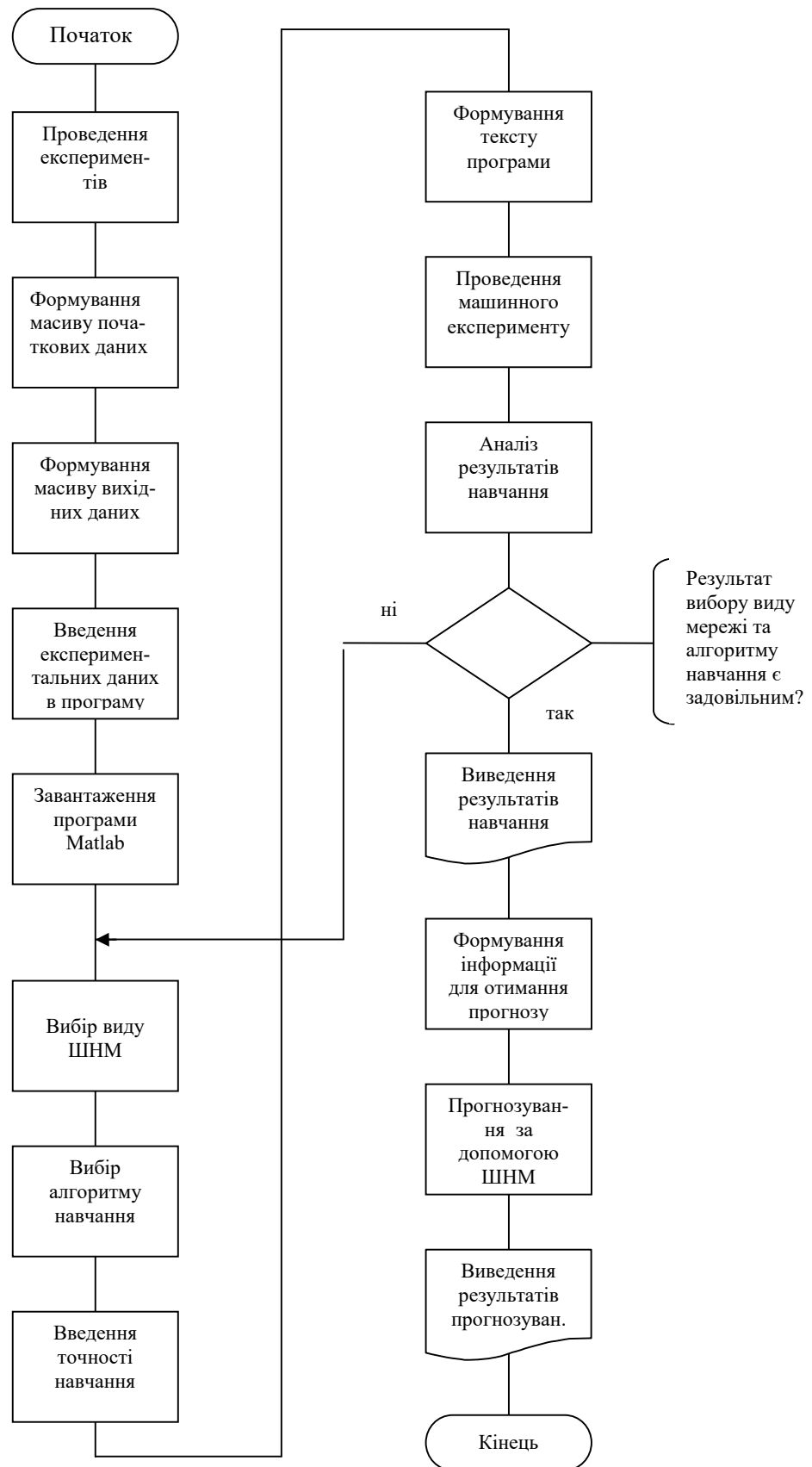


Рис. 4.19. Узагальнений алгоритм прогнозування за допомогою штучних нейронних мереж модуля Neural Network Toolbox пакету Matlab.

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 заготовки 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 змінювалась 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 P_x , P_y , P_z та шорсткість обробленої поверхні.

Для розв'язання задачі прогнозування параметрів процесу токарної обробки за даними, що наведені в таблиці 4.4, 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 4.4 послідовно видаляли досліді 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 4.5.

Таблиця 4.4.

Результати експериментальних досліджень токарної обробки сталі 20 інструментом із твердого сплаву ВК8

№ досліджу	Вхідні дані				Вихідні дані			
	V , м/хв	s , мм/хв	t , мм	τ , хв	P_x , H	P_y , H	P_z , H	R_z , 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

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 T15K6;
- сталі 40X13 різцем із T15K6;
- сталі 40X13 різцем із BK8;
- сталі 45 різцем із BK8;
- сталі 45 різцем із T15K6.

Таблиця 4.5.

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 BK8 при довільних значеннях вхідних параметрів в межах проведеного експерименту та навченої штучної НМ виконано відповідні розрахунки. Результати прогнозування наведено в таблиці 4.6.

З метою визначення ефективності використання ШНМ для прогнозування технологічних параметрів процесу фрезерування плоских поверхонь заготовок із корозостійкої сталі 40X13 торцевими фрезами з пластинами із твердого сплаву BK6M без охолодження проведено 30 дослідів, в яких використовувалися торцеві фрези діаметром від 100 до 300 мм, що оснащені пластинами із твердого сплаву BK6M. 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.

Таблиця 4.6.

Результати прогнозування вихідних параметрів процесу точіння сталі 20 інструментом із твердого сплаву ВК8 за довільними початковими даними

№ досліджу	Початкові дані				Вихідні дані			
	V , м/хв	s , мм/хв	t , мм	τ , хв.	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	R_z , 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

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 перевіірочну. Останню частину склали досліди з номерами 6, 12, 18 та 24. Після навчання мережі за навчальною послідовністю здійснено прогнозування потужності різання за даними в перевіірочній послідовності. Результати прогнозування та відповідні їм експериментальні дані наведено в таблиці 4.7.

Порівняння експериментальних і розрахункових даних показує, що їх розходження не перевищує 11%.

Виконано також аналогічні дослідження процесів фрезерування плоских поверхонь заготовок із жаростійкої сталі 10X11H20TХР торцевими фрезами з пластинами із сплаву ВК6М.

Таблиця 4.7.

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 N_p , 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

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 H_{sv} , величини зносу свердла по задній грані H_z , похибки обробки D_{Hsv} , осьової сили різання P_o , моменту кручення M_{kr} . Вхідними даними при проведенні експериментальних досліджень були швидкість різання V , подача s , глибина t та час різання τ .

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 4.8.

Таблиця 4.8.

Порівняння розрахункових та експериментальних значень моменту кручення при свердлінні отворів

№ п/п	Швид- кість різання $V, \text{м/хв}$	Подача $s, \text{мм/хв}$	Глиби- на різання $t, \text{мм}$	Час обробки $\tau, \text{хв}$	Експери- ментальні данні, $M_{kr}, \text{Н}\cdot\text{м}$	Розрахун- кові данні, $M_{kr}, \text{Н}\cdot\text{м}$
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

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 4.9.

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.

Таблиця 4.9.

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

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 4.10.

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 4.11.

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 Neural Network Toolbox дає можливість як будувати штучні нейронні мережі з довільною архітектурою, так

Таблиця 4.10.

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																
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>I</i>	<i>HB</i>	<i>R_{eH}</i>	<i>R_{p0,2}</i>	<i>R_m</i>	<i>S_k</i>	<i>A</i>	<i>Z</i>
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

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 4.11.

Результати класифікації конструкційного матеріалу

№ п.п.	Хімічний склад та фізико-механічні властивості матеріалу																	№ гр
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe	I	HB	R _{eH}	R _{p0,2}	R _m	S _k	A	Z	
реал	0.18	0.27	0.04	0.026	0.05	0.15	0.13	0.1	98.45		143	23.84	25.43	44.21	42.81	25.46	55.31	3
розр										4								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.

4.8.3 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.

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 4.12). В цій таблиці введено дані з такими позначеннями: t – глибина різання; n – частота обертів; D – діаметр заготовки; s – подача; P_x , P_y , P_z – 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 4.12, 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. 4.20.

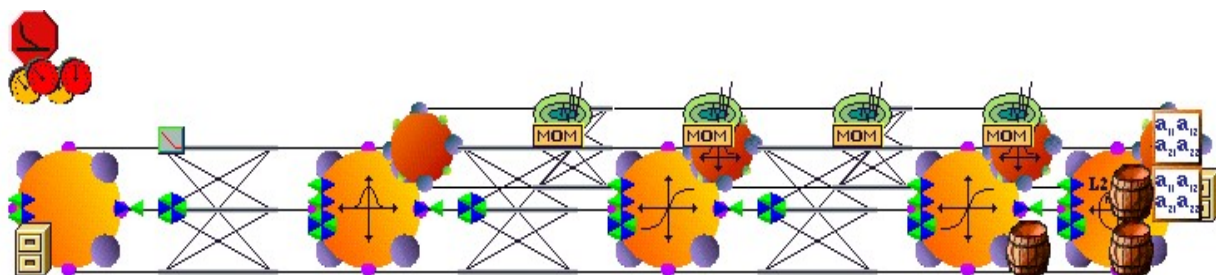


Рис. 4.20. Схема штучної нейронної мережі моделі RBF, що моделює досліджуваний процес.

В таблиці 4.12 досліди 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 4.13 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 4.12.

Результати експериментальних досліджень складових сили різання

№ п/п	Вхідні параметри					Вихідні параметри		
	Тип покрит.	t , мм	n , об/хв	D , мм	s , мм/об	P_x , H	P_y , H	P_z , 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.

В [4.116 – 4.118] наведено особливості та інші приклади використання штучних нейронних мереж для розв’язання технологічних задач.

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 Neural Network Toolbox пакету MatLab та систему NeuroSolutions.

Таблиця 4.13.

Порівняльні значення вихідних величин, що отримані в результаті проведеного експерименту, та їх прогнозовані значення

№ досліджу	Експериментальні значення			Прогнозовані значення		
	$P_x,$ H	$P_y,$ H	$P_z,$ H	$P_x,$ H	$P_y,$ H	$P_z,$ 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 Neural Network 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 порівнянні 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.

Висновки до розділу

На основі представленого огляду методів параметричного моделювання та аналізу областей їх застосування можна зробити наступні висновки.

1. Побудова математичної моделі складного об'єкта можлива на основі використання методів його декомпозиції на складові взаємопов'язані елементи та отримання математичних моделей цих складових частин. Це дозволяє значно спростити отримання адекватної моделі досліджуваного процесу, а в деяких випадках це є єдиною можливим варіантом розв'язання поставленої задачі.

2. Використання чисельних методів інтерполяції функцій з отриманням різноманітних степеневих і ортогональних поліномів, сплайн-функцій тощо дозволяє отримати математичні залежності вихідної величини тільки від однієї змінної. Із вказаних поліномів найкраще наближення до реальної функції дають сплайн-функції. Таким чином, чисельні методи інтерполяції доцільно застосовувати при розв'язанні задач ідентифікації та в якості внутрішніх процедур складних багатовимірних методів математичного моделювання;

3. Методи апроксимації функцій за методом найменших квадратів є ефективним методом отримання простих математичних залежностей вихідного параметру від однієї або кількох вхідних змінних при відомій її структурі, тобто при розв'язанні задач ідентифікації. Метод найменших квадратів доцільно використовувати в якості допоміжних (внутрішніх) процедур при розв'язанні задач багатовимірною моделювання;

4. Ефективними і часто застосовуваними методами отримання адекватних багатомірних математичних моделей параметрів є статистичні методи. Планування експериментів та обробка їх результатів методом регресійного аналізу дозволяє досить просто отримати лінійні математичні залежності, а в деяких випадках – нелінійні моделі. Але це потребує значної кількості експериментальних досліджень і, відповідно, значних витрат коштів та часу. В той же час не завжди можливо забезпечити встановлення вхідних параметрів в крайні точки факторного простору. Використання безпосередньо методу регресійного аналізу для отримання математичних моделей не потребує проведення експериментів за суворо встановленим планом, при цьому можна використовувати результати пасивного експерименту. Але це ускладнює обробку результатів експериментів та дозволяє отримати тільки моделі в вигляді поліномів, які зазвичай не адекватно описують досліджуваний процес. Для отримання адекватних математичних моделей необхідно застосовувати штучні прийоми, що базуються на досвіді проектувальника;

5. Значно зменшити кількість дослідів при проведенні планового експерименту і, відповідно, витрати часу та коштів при його реалізації можна шляхом застосування методів теорії подібності та аналізу розмірностей. Це потребує визначення – критеріїв, вирази яких можна легко встановити за допомогою розроблених алгоритмів та програми, що їх реалізує.

6. Методологія фрактального аналізу дозволяє отримати інтегральну кількісну оцінку поверхневого стану деталей, що обробляються різанням, шляхом врахування показників, які комплексно характеризують структуру та властивості оброблюваного матеріалу та параметри його поверхні. Крім того, використання дробової розмірності поверхні деталі дозволяє з більшою точністю визначити раціональні та оптимальні режими обробки поверхонь деталей, які потребують високих показників їх якості, та врахувати цю розмірність в розрахунках науково обґрунтованих припусків на обробку. Розроблені алгоритм та програма дозволяють визначити фрактальну розмірність, яку можна використовувати для точних розрахунків параметрів обробки матеріалів різанням.

7. Методи евристичної самоорганізації моделей дозволяють отримати єдину модель оптимальної складності за допомогою перебору великої кількості моделей по заданому критерію на основі незначної кількості апріорної інформації. Перевагою цих методів, на відміну від методів регресійного аналізу, є використання зовнішніх критеріїв вибору математичної моделі, що дозволяє об'єктивно оцінити якість моделювання досліджуваного параметру. Методи самоорганізації доцільно використовувати для отримання математичних моделей якщо досліджуваний об'єкт не є керованим, початкові

дані отримані в результаті проведення пасивного експерименту або статистичної обробки інформації; експеримент є керованим, але комбінація значень аргументів не може бути досягнута, або ж призводить до аварійної (критичної) ситуації, проведення планового експерименту потребує довготривалих та багатовитратних досліджень. Розроблені алгоритми та програми МГВА дозволяють отримати математичні моделі технологічних параметрів на основі незначної кількості початкової інформації, що дозволяє зменшити матеріальні, енергетичні та часові витрати при проведенні експериментальних досліджень

8. Нечіткий МГВА, наряду з усіма перевагами МГВА, не має недоліків класичного методу – він дозволяє отримати значення прогнозованих вихідних параметрів не в окремій точці, а в визначеному довірчому інтервалі, а також не має явища виродженості системи лінійних рівнянь при визначенні коефіцієнтів математичної моделі. Запропоновані алгоритми та програми нечіткого МГВА дозволяють прогнозувати та моделювати технологічні параметри при незначній кількості початкової інформації з більшою точністю в порівнянні з класичним методом.

9. Ефективним засобом моделювання та прогнозування технологічних параметрів, а також розв'язання задач класифікації, розпізнавання образів та зниження розмірності факторного простору є використання методів штучних нейронних мереж. Аналіз програмних засобів, які реалізують створення структури штучної НМ та алгоритмів її навчання, показав, що для розв'язання задач моделювання та прогнозування технологічних параметрів доцільно застосовувати модуль Neural Network Toolbox програмного пакету та систему NeuroSolutions. Розроблені алгоритми та програми, що реалізують штучні НМ засобами пакету MatLab, та їх використання для розв'язання задач моделювання та прогнозування технологічних параметрів й класифікації технологічних об'єктів показав їх ефективність та доцільність їх використання в задачах технологічної підготовки виробництва. Практична апробація системи NeuroSolutions для розв'язання різноманітних задач показала, що дана система має широкий набір різноманітних архітектур штучних НМ, який дозволяє підібрати відповідну структуру та вказати параметри її навчання. Ця система має зручний та доступний інтерфейс, що дозволяє легко оволодіти методикою використання штучних НМ для розв'язання технологічних задач. Крім того, система NeuroSolutions дозволяє отримати програму на одній із мов програмування, яка моделює роботу налаштованої нейронної мережі для моделювання досліджуваних процесів та прогнозування технологічних параметрів згідно з заданими початковими даними.

10. Сумісне використання методів штучних нейронних мереж та евристичної самоорганізації моделей дозволяє організувати комп'ютерний експеримент, який дає можливість в значній мірі зменшити матеріальні, енергетичні та часові витрати при проведенні експериментальних досліджень, реалізувати сучасні інформаційні технології в ТПВ та є необхідною умовою впровадження CALS – технологій в приладобудуванні.

Перелік посилань до розділу 4

- 4.1. Фролов В. Н., Львович Я. Е., Меткин Н. П. Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» – М.: Высш. шк., 1991. – 463с.
- 4.2. Математика в САПР: в 2 кн./ Под ред. Н.Г. Волкова, кн. 1. – М.: Мир, 1988. – 206 с, кн. 2. – М.: Мир, 1989. – 260 с.
- 4.3. Бешенков С.А., Ракитина Е.А. Моделирование и формализация: Метод. пособие. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 333с.
- 4.4. Советов Б.Я. Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
- 4.5. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. – М.: Наука, 1984.. – 320 с.
- 4.6. Аверченков В.И., Федоров В.П. Хейфец М.Г. Основы математического моделирования технических систем: Учеб. Пос. – Брянск: БГТУ, 2004. – 271 с.
- 4.7. Дружинін Є.А., Латкін М.О., Луханін М.І., Косенко В.В. Системні та інформаційні технології аналізу проектуємих складних систем. / Вісті Академії інженерних наук України. 2000, №4. С. 98 – 108.
- 4.8. Скурихин В.И. и др. Математическое моделирование / В.И. Скурихин, В.Б. Шифрин, В.В. Дубровский. – К.: Техніка, 1983. - 270 с.
- 4.9. Автоматика и управление в технических системах: В 11 книгах / Отв. Ред. С.В. Емельянов, В.С. Михалевич. – К.: Вища шк., 1992. – Кн. 3. Моделирование производственных систем / Б.Ф. Фомин, В.Б. Яковлев; Под ред. В.Б. Яковлева. – 191 с.
- 4.10. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 –ти книгах. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: Учеб. пособие для втузов / С.В. Пантюшин, В.М. Назаров, О.А. Тягунов и др.; Под ред. И.М. Макарова. – М.: Высш.шк., 1986. – 176 с.
- 4.11. Цыпкин Я.З. Методы оптимизации сложных систем. – М.: Наука, 1987. – 168 с.
- 4.12. Остафьев В.А., Выслоух С.П., Антонюк В.С. Оптимизация обработки лезвийным инструментом.// Сб. «Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования технологических процессов в машиностроении», Изд. ЦИНТО МАШПРОМ, Москва, 1980. – С. 78 – 82.
- 4.13. Соломенцев Ю.М., Остафьев В.А., Выслоух С.П. и др. САПР. Типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов одноинструментальной обработки материалов резанием. Методические рекомендации МР 119-85. – М.: ВНИИНМАШ, 1985. – 120 с.
- 4.14. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. – М.: Наука, 1970. – 664с.

- 4.15. Краскевич В.Е, Зеленский К.Х., Гречко В.И. Численные методы в инженерных исследованиях. - К.: Вища школа, 1986. – 263 с.
- 4.16. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы.– М.: Наука, 1989.– 430 с.
- 4.17. Кук Д., Бейз Г. Компьютерная математика. – М.: Наука, 1990.– 383с. Дьяконов В.П. Компьютерная математика. Теория и практика. – М.: Нолидж, 2001. – 1296 с.
- 4.18. Поршнев С.В. Вычислительная математика. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.
- 4.19. Бахвалов Н. С. Численные методы. / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 4-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 636 с.
- 4.20. Статистические методы для ЭВМ / Под ред. К. Энслейна, Э. Рэлстоуна, Г.С. Уилфа; Пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 460 с.
- 4.21. Налимов В. В., Чернова А.А. Статистические методы планирования эксперимента. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
- 4.22. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М.: Металлургия, 1968. – 155 с.
- 4.23. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техника, 1975. – 168 с.
- 4.24. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: 1976. – 279 с.
- 4.25. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / Под ред. Э.К.Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
- 4.26. Душинский В.В., Пуховский Б.В., Радченко С.Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. – К.: Техника, 1977. – 175 с.
- 4.27. Петрович М.Л. Регрессионный анализ и его математическое обеспечение на ЕС ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 199 с.
- 4.28. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С.М. Ермакова. – М.: Наука, 1983. – 391 с.
- 4.29. Егоров А. С., Азаров Г. Н. Коваль А. В. Исследование устройств и систем автоматики методом планирования эксперимента. – Харьков: Вища шк., 1986. – 240 с.
- 4.30. Душинский В.В., Кравченко С.Г. Моделирование и оптимизация в машиностроении.– К.: НМК ВО, 1992. – 304 с.
- 4.31. Душинський В.В., Кравченко С.Г. Моделювання та оптимізація в машинобудуванні: Навч. посібник для студ. машинобуд. спец./ КПІ. – К.: НМКВО, 1993. – 290 с.
- 4.32. Душинський В.В. Сучасні методи аналізу технологічних процесів в машинобудуванні: Навч. посібник/ ІСДО. КПІ. – К., 1994. – 216 с.
- 4.33. Румишинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
- 4.34. Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М. Планирование и организация измерительного эксперимента. – К.: Вища школа, 1987. – 279 с.

- 4.35. Петрович М.Л., Давидович М.И. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 189 с.
- 4.36. Статистика: Курс лекций: Для студ. вузов напр. «Статистика» / НГАЭ и У; Л.П. Харченко, В.Г. Долженкова, В.Г. Ионин и др.; Под ред. В.И. Ионина. – Новосибирск: Из-во НГАЭ и У; – М.: ИНФРА, 1996. – 310 с.
- 4.37. Выслоух С.П., Держук В.А. Математическое моделирование технологических параметров процесса обработки композиционных материалов. //Сб. «Композиционные материалы в промышленности» (СЛАВПОЛИКОМ-99) (Тезисы докладов Международной конференции 11- 13 мая 1999г.) –Киев, 1999. с.39-41.
- 4.38. Антонюк В.С., Выслоух С.П. Исследование процесса платовершинного хонингования методом математического моделирования. //Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. “Шлифование 99”. Сб. Трудов международной конференции 6 –11 сентября 1999г. –Волжский, 1999. – С. 183–187.
- 4.39. Трапезон А.Г., Мирненко В.И., Антонюк В.С., Выслоух С.П. Исследование покрытий, технологии их нанесения и условий эксплуатации. //Материалы IV INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TRIBO-FATIGUE ISTF 2002. Ternopile, 2002. – С. 498–503.
- 4.40. Кирпичев М. В. Теория подобия. – М.: Изд-во АН СССР, 1953 – 96 с.
- 4.41. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высш. школа, 1976. – 479 с.
- 4.42. Силин С.С. Теория подобия в приложении к технологии машиностроения: Учебное пособие/ Ярославль, ЯПИ, 1989. –108 с.
- 4.43. Кондаков А.И., Зайцев Е.Б., Терехин М.В. Использование подобия решений для повышения эффективности технологической подготовки производства. . / Вестник машиностроения , 2004, №6. – С. 54–57.
- 4.44. Выслоух С.П. Исследование путей повышения эффективности процесса материалобработки на основе его параметрической оптимизации. Дис. канд. техн. наук: 05.03.01. – К.: КПИ, 1978. – 248 с.
- 4.45. Мандельброт Б. Самоафинные фрактальные множества. – М.: Мир, 1988. – 672 с.
- 4.46. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
- 4.47. Федер Енс. Фракталы /Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 260 с
- 4.48. Пайнтген Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. – М.: Мир, 1993. – 176 с.
- 4.49. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оскогоев. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
- 4.50. Фракталы в физике: Труды VI международного симпозиума по фракталам в физике (МУТФ, Триест, Италия, 9 – 12 июля 1985): Пер. С англ. /Под ред. Л.Пьетронело, Э. Тозатти. – М.: Мир, 1998 – 672 с.
- 4.51. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах.– М.: Техносфера, 2006. – 484 с.

4.52. Кликушкин Ю.Н. Идентификационные шкалы: теория, технологии, системы. // Рукоп. диссерт. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. – Омск, Омский госуд. техн. ун-т, 2000.

4.53. Клименко С.А., Мельничук Ю.А., Копейкина М.Ю. Совершенствование представлений о процессе резания на основе фрактальной параметризации структуры и свойств обрабатываемого материала. // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования: Сб. Науч. Тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструмент. – К.: 2002. – С. 159–171.

4.54. Клименко С.А., Мельничук Ю.А. Фрактальный подход к обработке резанием материалов и изделий // Сучасні процеси механічної обробки інструментом з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць. – Київ: ІНМ НАНУ ім. В.М. Бакуля, 2001. – С. 41–49.

4.55. Клименко С. А., Мельничук Ю.О. Шорсткість поверхні при точінні напилених покриттів із аморфно-кристалічною структурою // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 2001. – Спец. вип. – С. 176–183.

4.56. Клименко С.А., Мельничук Ю.О., Встовський Г.В. Фрактальна параметризація структури матеріалів. Їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту. – Київ: ІН Мім. В.М. Бакуля, 2009. – 172 с.

4.57. Симута Н.А., Выслоух С.П. Определение технологических параметров процесса механообработки методами фрактального анализа. // Пята науково-технічна конференція „ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2006: стан і перспективи”. Збірник тез доповідей. – Київ, НТУУ „КПІ”, 2006. – С. 106.

4.58. Симута М.О., Вислоух С.П. Використання методів фрактального аналізу для моделювання технологічних параметрів процесу різання. /Тези доповідей П'ятої Всеукраїнської науково-технічної конференції „Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво”. – Суми: СумДУ, 2005. – С. 85–87.

4.59. Ивахненко А.Г. Самоорганизующиеся системы распознавания и автоматизированного управления. . – Киев: Техника, 1969. – 391 с.

4.60. Ивахненко А.Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. – Киев: Техника, 1971. – 364 с.

4.61. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: Техника, 1975. – 312 с.

4.62. Ивахненко А.Г., Зайченко Ю.Л., Димитров В.Д. Принятие решений на основе самоорганизации. – М.: Сов. радио, 1976. – 210 с.

4.63. Справочник по типовым программам моделирования. /Ивахненко А.Г., Копя Ю.В., Степашко В.С. и др.; Под ред. А.Г. Ивахненко. – К.: Техника, 1980. – 184 с.

4.64. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – Киев: Наукова думка, 1982. – 236 с.

- 4.65. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – Киев: Техніка, 1985, – Берлин: ФЕБ Ферлаг Техник, 1984. – 223 с.
- 4.66. Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М.: 1986. – 120 с.
- 4.67. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем: (информационный подход). – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 63 с.
- 4.68. Ивахненко А.Г. Алгоритмы МГУА при непрерывных и бинарных признаках. – К.: 1992. – 178 с.
- 4.69. Mueller J.A., Lemke F. Self-Organizing Data Mining. – Berlin, Dresden, 1999. – 225 p.
- 4.70. Равская Н.С. Разработка прогрессивных режущих инструментов на основе моделирования их работы методом самоорганизации. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.01. – К.: КПИ, 1991. – 32 с.
- 4.71. Антонюк В.С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу. Дис. д-ра техн. наук: 05.03.01. – К.: НТУУ „КПІ”, 2006. – 383 с.
- 4.72. Вороніков В.В., Коваленко М.В. Застосування методу групового врахування аргументів для вибору узагальнених параметрів. /Вісник ЖІТІ. 2000, №7. – С. 189–194.
- 4.73. Зайченко Ю.П., Кебкел О.Г., Крачковский В.Ф. Нечіткий метод групового врахування аргументів та його застосування в задачах прогнозування макроекономічних показників // Наукові вісті НУТУ «КПІ». – 2000, № 2, – С. 18–26.
- 4.74. Зайченко Ю.П., Заєць І.О. Синтез та адаптація нечітких прогнозуючих моделей на основі методу самоорганізації // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – №3. – С. 34–41.
- 4.75. Зайченко Ю.П., Заєць І.О. Застосування рекурсивних методів ідентифікації в задачах синтезу нечітких прогнозуючих моделей // Міжнар. конф. з індуктивного моделювання. Львів, 20 – 25 травня 2002 р. Праці в 4-х томах. – Т. 2. – С. 59–65.
- 4.76. Зайченко Ю.П. Нечеткий метод индуктивного моделирования в задачах прогнозирования макроэкономических показателей. // Системні дослідження та інформаційні технології. 2003, №3. – С. 25–45.
- 4.77. Зайченко Ю.П., Заєць І.О., Камоцький О.В., Павлюк О.В. Дослідження різних видів функцій належності в нечіткому методі групового врахування аргументів // УСиМ. – 2003. – № 2. – С. 56 – 67.
- 4.78. Зайченко Ю.П. Основи проектування інтелектуальних систем. Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Слово», 2004. – 352 с.
- 4.79. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
- 4.80. Карпов В.Х., Дубровский С.А. Методы обработки данных в системах с нечеткой информацией. – Фрунзе, 1988. – 187 с.
- 4.81. Малышев Н.Г. и др. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М.: Энергоиздат, 1991. – 134 с.

4.82. Катрук О.В., Вислоух С.П. Применение нечеткого метода группового учета аргументов для моделирования технологических параметров. //Тези доповідей П'ятої Всеукраїнської науково-технічної конференції „Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво”. – Суми: СумДУ, 2005. – С. 38–40.

4.83. Вислоух С.П., Катрук О.В. Моделирование технологических параметров нечетким методом группового учета аргументов. //Тези доповідей шостої Всеукраїнської науково-технічної конференції „Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво”. – Хмельницький: ХНУ, 2006. С. 46 – 47.

4.84. Вислоух С.П., Катрук О.В. Моделирование технологических параметров нечетким методом группового учета аргументов. / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2007, №1 (89). – С. 169 – 172.

4.85. Вислоух С.П., Катрук О.В., Заїка А.І. Дослідження стійкості різального інструмента при токарній обробці титанового сплаву. //Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технологии его изготовления и применения.: Сборник научных трудов. Выпуск 11. – Киев: 2008. – С. 464-467.

4.86. Вислоух С.П., Катрук О.В. Заїка А.І. Моделирование та прогнозування сил різання та шорсткості обробленої поверхні нечетким методом группового учета аргументов. //Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. – 2008. – Вип. 36. – С. 89–95.

4.87. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Катрук О.В. Моделирование сил при фрезеровании тонкостенных деталей из алюминия. //Сб. Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 10-й Международной научно-технической конференции, 24 - 28 мая 2010 г., г. Ялта. – Киев: АТМ України, 2010. – С. 13-16.

4.88. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. – М.: Мир, 1992. – 642 с.

4.89. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. – Новосибирск: Наука, 1996. – 276 с.

4.90. Горбань А.Н., Дубинин-Барковский В.Л., Кирдин А.Н. Нейроинформатика. – СПб.: Наука, 1998. – 384 с.

4.91. Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Кирдин А.Н. и др. Нейроинформатика. – Новосибирск: Наука, 1998. – 296 с.

4.92. Терехов С.А. Лекции по теории и практике нейронных сетей. – М., 1998. http://alife.narod.ru/lectures/neyrnal/neu_index.htm.

4.93. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе. – Боруйск, 1998. – 286 с.

4.94. Короткий С.Г. Нейронные сети: основные положения. // ВУТЕ/Россия, 2000, № 5. – С. 18-21.

4.95. Короткий С.Г. Нейронные сети: алгоритм обратного распространения. // ВУТЕ/Россия, 2000, № 5. – С. 26–29.

- 4.96. Короткий С. Нейронные сети: обучение без учителя // <http://www.neuropower.de/rus/books/index.html>.
- 4.97. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 386 с.
- 4.98. Круглов В.В. и др. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
- 4.99. Дубровин В.И., Суботин С.А. Алгоритм нейросетевого отбора признаков. – М.: „Издательское предприятие журнала Радиотехника”, 1999. – С. 19–22.
- 4.100. Дубровин В.И., Суботин С.А., Кривенко В.И., Евченко Л.Н. Сокращение объема данных в задачах распознавания и диагностики, сборник докладов, – М.: „Издательское предприятие журнала Радиотехника”, 1999 – С. 23–26.
- 4.101. Дубровин В.И., Адаменко В.А., Суботин С.А. Автоматизированная система вибродиагностики на основе нейронных сетей. – М.: „Издательское предприятие журнала Радиотехника”, 2000. – С. 9–14.
- 4.102. Дубровин В.И., Суботин С.А. Оценка значимости признаков на основе многослойных нейронных сетей в задачах диагностики и распознавания образов. – М.: „Издательское предприятие журнала Радиотехника”, 2001. – С. 12–16.
- 4.103. Дубровин В.И., Суботин С.А. Нейросетевая интерпретация алгоритма многомерной классификации. – М.: „Издательское предприятие журнала Радиотехника”, 2000.
- 4.104. Итоги науки и техники: физические и математические модели нейронных сетей. Том 1. – М.: ВИНТИ, 1990. – 324с.
- 4.105. Цыганков В.Д. Нейрокомпьютер и его применение. – М.: Сол Систем, 1993. – 360с.
- 4.106. Дьяконов В., Круглов В. Математические расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2001. – 480 с.
- 4.107. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети: Matlab 6. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 489 с.
- 4.108. Іваницька Т.В. Нейронні мережі для контролю та управління в електроенергетиці. / Вісник ЖІТІ. 2000, №7. – С. 275–280.
- 4.109. Адамів О.Л. Нейромережева обчислювальна система управління мобільним роботом по заданій траєкторії. / Вісник Технічного університету Поділля, № 3, 2002 /т.1. – С. 158–161.
- 4.110. Грабовський В.М., Муляр А.А. Використання штучних нейронних мереж для моделювання екологічних об'єктів. / Вісник Технологічного університету Поділля. №3, 2002/ Т.1. – С. 212–215.
- 4.111. Білас О.Є., Томашевський О.М. Нейромережева класифікація станів та зашумлених даних у системах керування. / Вісник Технологічного університету Поділля. №3, 2002/ Т.1. – С. 185–189.
- 4.112. Шевченко С.Ю. Применение нейронных сетей для прогнозирования твердости сталей после закалки. / Заготовительные производства в машиностроении. 2004, № 9. – С. 44–48.

4.113. Гітіс В.Б. Удосконалення нормування часу механообробки деталей у одиночному та дрібносерійному виробництві на основі нейронних мереж. – Донецьк: ДДТА, 2006. – 26 с.

4.114. Девин А.Н., Найдено А.Г., Мельниченко С.В. Применение искусственных нейронных сетей для анализа акустической эмиссии из зоны резания. / Сб. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления: Сборник научных трудов. – Вып. 8. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2005. – С. 292 – 295.

4.115. Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Биленко С.В. Адаптивное управление технологическими системами механообработки на основе искусственного интеллекта. // Вестник машиностроения, 2004, №6. – С. 46–48.

4.116. Вислоух С.П. Нейронные сети в задачах технологической подготовки производства. // Технологическое управление качеством поверхности деталей машин: Материалы Международной научной конференции, 11-13 ноября 2003 г. – Киев: АТМ Украины, 2003. – С. 28–30.

4.117. Вислоух С.П. Нейросетевое моделирование технологических параметров процесса резания. // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. – техн. сборник. – Харьков. НТУ «ХПИ», 2005, Вып. 68. – С. 109–116.

4.118. Почтар Ю.О., Вислоух С.П. Використання алгоритмів штучних нейронних мереж для розв'язання технологічних задач /Тези доповідей П'ятої Всеукраїнської науково-технічної конференції „Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво”. – Суми: СумДУ, 2005. – С. 72–74.

РОЗДІЛ 5

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

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 однокритеріального 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.

Наряду з описом методів математичного нелінійного програмування в розділі надано алгоритми їх реалізації, а також приклади практичного використання цих методів.

5.1 Рекомендації з використання методів параметричної оптимізації

В даний час для розв'язання задач параметричної оптимізації використовують різноманітні методи, класифікацію яких наведено на рис. 1.5 розділу 1.

Вибір того або іншого методу рішення оптимізаційних задач залежить в основному від наступних чинників:

- від приналежності задачі дослідження системи та оптимізації її параметрів до того або іншого класу;
- від способу завдання критерію оптимізації;
- від лінійності або нелінійності математичної моделі розв'язуваної задачі;
- від часу і засобів, що є у розпорядженні відповідального за вироблення оптимальних рішень;

- від особистих схильностей і рівня підготовки того, що виробляє оптимальне рішення;
- від якості і кількості інформації про об'єкт оптимізації.

Аналітичні методи, як правило, надають наочну картину досліджуваної системи (процесу) і параметрів, що його характеризують. Проте побудова математичної моделі, зручної для аналітичного дослідження, є складною задачею. До аналітичних методів дослідження об'єктів та оптимізації їх параметрів відносять метод прямого перебору, класичний метод диференціального числення, метод множників Лагранжа тощо.

Метод прямого перебору. Якщо відомо функціональний зв'язок цільової функції Y і оптимізуючої змінної X , то отже можна обчислити значення цільової функції по відповідних значеннях змінної X . Обчислення повторюють до тих пір, поки не буде знайдено \min (\max) значення цільової функції. Цей метод може бути використано для розв'язання задач оптимізації параметрів, якщо кількість змінних оптимізації незначна (одна або дві) та в невеликому діапазоні їх зміни. Особливість і переваги методу прямого перебору полягають: у незалежності пошуку від вигляду і характеру цільової функції; у циклічності пошукової процедури; у визначенні глобального екстремуму цільової функції; в простоті алгоритму і програми оптимізації; в малому об'ємі необхідної машинної пам'яті. Головним недоліком методу є тривалий час роботи ЕОМ. У разі великої області допустимих значень оптимізуючих змінних та наявності більш ніж одного екстремуму цільової функції використання цього методу не є ефективним [5.1 – 5.14].

Класичний метод диференціального числення. Якщо відомо функціональний зв'язок цільової функції з оптимізуючими змінними $Y=f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$, що має безперервні перші часткові похідні, то, визначивши часткові похідні по кожній змінній оптимізації, прирівнявши часткові похідні від Y по x_i нулю і розв'язавши спільно систему рівнянь, визначимо значення x_{ic} , що дають стаціонарні значення цільової функції, серед яких знаходяться оптимальні. На перший погляд здається, що використання цього методу дозволяє досить просто розв'язувати задачу визначення оптимуму нелінійної функції декількох змінних. Проте це не так. Існує ряд труднощів при його реалізації і обмежень по застосуванню цього методу:

- 1) при великій кількості параметрів, що оптимізуються, даний метод стає вельми складним в частині рішення системи рівнянь;
- 2) умова визначення екстремуму, що визначена системою рівнянь, є необхідною, але не достатньою для розв'язання задачі оптимізації. Оскільки розв'язання системи рівнянь дозволяє визначати положення стаціонарних точок усередині області, серед яких, окрім екстремальних, можуть бути особливі точки типу „сідло”, облік достатніх умов знаходження екстремумів функції багатьох змінних є складним як в алгоритмічному, так і в обчислювальному плані;

3) даний метод дає можливість знайти екстремум тільки в тому випадку, якщо він лежить всередині, а не на межі області можливих значень змінних, отже, потрібний додатковий аналіз значень функції;

4) цільова функція, повинна бути безперервною і мати перші і другі похідні по параметрах, що оптимізуються;

5) необхідно, щоб параметри, що оптимізуються, визначали значення мінімуму або максимуму функції, були незалежними, тобто не повинно бути додаткових рівнянь, що зв'язують між собою частину параметрів [5.11, 5.13, 5.14].

Метод множників Лагранжа. За допомогою цього методу можна визначити екстремальні точки функції багатьох змінних при наявності додаткових зв'язків між параметрами, що оптимізуються. Згідно з цим методом будується нова цільова функція $L(x_1, x_2, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_p)$ шляхом введення в її склад функцій, що зв'язують оптимізуючі змінні, з своїми множниками Лагранжа $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, p$, де p – кількість функцій, що введені в нову цільову функцію. Необхідні умови екстремуму полягають в рівності до нуля всіх перших часткових похідних від L по x_1, x_2, \dots, x_n та $\lambda_1, \dots, \lambda_p$. В результаті отримаємо $n+p$ рівнянь з $n+p$ невідомими. Розв'язання цих рівнянь відносно змінних x_1, \dots, x_n та $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ дає можливість визначити положення стаціонарної точки. Використання допоміжної функції $L(X, \lambda)$ дозволяє замінити задачу оптимізації з додатковими умовами задачею без них. Недоліком методу множників Лагранжа є введення p додаткових змінних, які повинні бути визначені за допомогою p додаткових рівнянь. Крім того, для цього методу зберігають свою силу недоліки і труднощі класичного методу диференціального числення. Принциповим недоліком методу множників Лагранжа є неможливість розв'язання за його допомогою задач, що мають обмеження в вигляді нерівностей [5.11 – 5.14].

Враховуючи вищенаведені характеристики аналітичних методів, вони знайшли обмежене використання в задачах оптимізації технологічних параметрів. Для розв'язання окремих, спеціальних задач використовують наведений метод множників Лагранжа.

Оптимізація за допомогою чисельних методів менш наочні в порівнянні з аналітичним, але клас моделей, придатних для дослідження чисельними методами, значно ширший. Розв'язання таких задач вимагає великої обчислювальної роботи за наявності великої кількості оптимізуючих змінних і умов функціонування досліджуваної системи (процесу). В даний час ці методи знаходять все більш широке застосування на практиці у зв'язку з інтенсивним впровадженням сучасних ЕОМ і відповідного програмного забезпечення..

Серед чисельних методів найбільшого поширення для розв'язання задач параметричної оптимізації набули:

1) для оптимізації унімодальних функцій однієї змінної – методи дихотомії, чисел Фібоначчі і золотого перетину;

2) для функцій декількох змінних – методи покоординатного спуску, градієнтні методи, метод найшвидшого спуску, методи Ньютона, методи математичного програмування тощо [5.1 – 5.14].

Методи пошуку екстремуму унімодальних функцій. Функція однієї змінної, що має в інтервалі дослідження один горб (западину), є унімодальною. Вона може бути гладкою і навіть безперервною, може бути зламаною (що не диференціюється), розривною і навіть може, в деяких точках інтервалу бути невизначеною. Припущення унімодальності не пов'язане з жорсткими обмеженнями і виконується в багатьох практичних завданнях пошуку оптимуму. Аналітичні методи не можна застосовувати до функцій із зламами і до розривних функцій. Якщо цільова функція унімодальна, то можна звужити інтервал дослідження функції на оптимум шляхом визначення значень цільової функції в двох точках інтервалу завдання функцій $Y(x_i)$ і $Y(x_s)$ і подальшого поінтервального порівняння. Послідовно звужуючи інтервал дослідження, в якому знаходиться оптимальне значення шуканої змінної, можна з достатньою точністю знайти оптимальне значення критерію оптимальності. Для цього необхідно виробити таку стратегію пошуку, щоб за надану кількість кроків (етапів) визначити мінімальний інтервал, в якому лежить шуканий оптимум, або звести початковий інтервал до області заданої довжини за мінімальну кількість кроків (розрахунків).

До послідовних детермінованих методів пошуку екстремуму унімодальних функцій, що враховують результати попередніх кроків, відносяться методи дихотомії, чисел Фібоначчі і золотого перетину [5.11, 5.13, 5.14].

Метод дихотомії (половинного поділу). Згідно з цим методом шукана довжина інтервалу дослідження, в якому знаходиться оптимум, зменшується з кожним кроком майже в два рази. На відміну від методу прямого перебору, в якому ефективність пошуку прямо пропорційна кількості розрахунків, в методі дихотомії ефективність зростає експоненціально зі збільшенням номера ітерації.

Метод чисел Фібоначчі. Яким би не був ефективним метод дихотомії, існує ще більш досконалий. Згідно з методом чисел Фібоначчі точка поділу інтервалу дослідження визначається з кожним новим розрахунком. У інтервал дослідження потрапляє попередній розрахунок, для продовження пошуку досить лише провести розрахунок нової точки. Таким чином, на кожному етапі обчислення використовується раніш визначене значення цільової функції, яке порівнюється зі значенням функції в новій точці поділу. При виконанні операції поділу відрізка, в якому знаходиться оптимальне значення цільової функції, використовуються числа Фібоначчі.

Метод золотого перетину. Метод Фібоначчі вимагає додаткових розрахунків, оскільки наперед невідома кількість циклів обчислення. Проте існує ще один метод, який абсолютно не залежить від кількості виконуваних обчислень і майже такий ефективний, як метод чисел Фібоначчі. При діленні відрізка дослідження використовують правило золотого перетину в

співвідношенні $1/0,62$, а потім більший відрізок ділиться в тому ж співвідношенні. В залежності від значень цільової функції в точках поділу залишається для дослідження відповідний підінтервал. Ефективність методів золотого перетину та чисел Фібоначчі однакова тому, що точки поділу інтервалу дослідження в обох методах співпадають.

Розглянуті методи оптимізації унімодальних функцій (функцій однієї змінної) використовують в основному в якості внутрішньої процедури для одновимірної оптимізації в багатомірних оптимізаційних задачах.

Регулярні методи оптимізації. Регулярними (детермінованими) методами оптимізації є така направлена система дій, яка суворо обумовлюється ситуацією, що склалася. В даний час існує багато методів регулярної оптимізації. Характерною межею їх є використання в процесі рішення завдання результатів кожного даного кроку (іноді також і попередніх кроків) пошуку оптимальної точки для визначення напрямку зміни оптимізуючих параметрів на кожному наступному кроці. При цьому значення цільової функції систематично зменшується (або збільшується) [5.9 – 5.14].

До детермінованих методів оптимізації в першу чергу відносяться методи направленного пошуку за допомогою почергової зміни параметрів. Це метод покоординатного спуску (або підйому), градієнтні методи, метод найшвидшого спуску (або підйому), методи Ньютона тощо.

Метод покоординатного спуску (або підйому, почергової зміни параметрів, метод Гауса – Зейделя). Суть цього методу полягає в почерговій оптимізації послідовно по кожному оптимізуючому параметру. Для цього в якості внутрішньої процедури використовують один із раніше розглянутих методів одновимірної оптимізації. Тут спочатку оптимізація здійснюється по одному параметру X^1 потім переходять до другого X^2 і так далі, поки значення цільової функції не перестануть зменшуватися (або зростати). Недоліками методу є:

- а) метод забезпечує отримання тільки локального оптимуму;
- б) дозволяє оптимізувати тільки параметри, що безперервно змінюються;
- в) результати пошуку істотно залежать від вдалого вибору першого напрямку руху та початкової точки;
- г) ефективність методу істотно знижується за наявності обмежень.

Перевагою методу є простота алгоритму та програми розв'язання задачі параметричної оптимізації.

Градiєнтний метод є найбільш поширеним регулярним методом пошуку екстремуму цільової функції. Існує кілька різновидів градієнтного методу але сутність цих методів однакова. Процес оптимізації за методом градієнта полягає у визначенні напрямку найбільшої зміни цільової функції і деякому переміщенні в цьому напрямку. Напрямок найбільшої зміни функції визначається напрямом градієнта функції, що оптимізується. Для знаходження складових градієнта необхідно обчислити часткові похідні цільової функції по оптимізуючих параметрах. Недоліками методу є:

- 1) необхідність перед кожним робочим кроком проводити досить складний попередній аналіз;
- 2) за наявності обмежень застосування методу ускладнюється;
- 3) необхідність визначати часткові похідні цільової функції по параметрах, що оптимізуються;
- 4) невисока швидкість досягнення оптимуму;
- 5) труднощі в досягненні кінцевої точки (оптимуму);
- 6) велика чутливість методу до масштабних перетворень.

Перевагою методу є його точність, оскільки на кожному робочому кроці проводиться спроба рухатися в якнайкращому напрямку.

Метод найшвидшого спуску (підйому). Це різновид градієнтного методу, що забезпечує найменшу кількість кроків у визначенні оптимуму. Суть його зводиться до наступного. Після визначення градієнта цільової функції $Y=f(x)$ робиться крок в напрямі, зворотному градієнту (при знаходженні мінімуму функції). Якщо значення цільової функції при цьому зменшилося в порівнянні з попереднім результатом, то робиться черговий робочий крок в тому ж напрямку, а не визначається наново градієнт, як це робиться в градієнтному методі. Якщо ж після чергового робочого кроку значення цільової функції збільшилося в порівнянні з попереднім значенням, то рух припиняється, наново визначається напрям градієнта і т.д. Підвищена швидкість збіжності є істотною перевагою цього методу. Для визначення шуканого оптимуму необхідно заздалегідь визначити всі аналітичні вирази перших і других похідних від початкової цільової функції.

Методи Ньютона. Методи, які наведені вище, мають один загальний недолік – повільна збіжність, якщо поверхні (лінії) рівня цільової функції, витягнуті тобто дуже відрізняються від сфер (кіл). У методі Ньютона цей недолік усувається врахуванням значень других похідних. Якщо поблизу стаціонарної точки X^* цільова функція $f(X)=f(x_1, \dots, x_n)$ має двічі безперервно похідні та її матриця Гессе

$$H(X) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_1} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_n} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_n} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n^2} \end{pmatrix}$$

позитивно визначена, тобто $\det(H(X)) \neq 0$, то, розпочинаючи з деякої початкової точки X^0 , можна визначити наступне наближення до оптимального рішення X^* згідно з формулою

$$X^{k+1} = X^k - H^{-1}(X^k) \cdot \text{grad } f(X^k),$$

де $H^l(X^k)$ – матриця, що є оберненою до матриці Гессе на k – й ітерації;

k – номер ітерації, $k=0,1,2,\dots$.

Метод Ньютона має підвищену збіжність, але він потребує визначення матриці $H^l(X^k)$ на кожній ітерації, що значно ускладнює процес обчислень. Крім того, треба врахувати, що в методі Ньютона на похибку обчислення накладається похибка обернення матриці $H(X^k)$. У зв'язку з цим для функції n змінних при великому n застосовують модифікований метод Ньютона, згідно з яким

$$X^{k+1} = X^k - H^l(X^0) \cdot \text{grad } f(X^k),$$

тобто матриця, що є оберненою до матриці Гессе, вираховується один раз в початковій точці X^0 . Позитивна визначеність матриці $H(X)$ забезпечує збіжність методу Ньютона, причому збіжність буде квадратичною, а при застосуванні модифікованого методу Ньютона – лінійною.

Наведені регулярні методи успішно використовуються для розв'язання задач параметричної оптимізації [5.9 – 5.22]. Але велика розмірність розв'язуваних задач, наявність обмежень на область допустимих рішень, нелінійна залежність критерію оптимальності та функцій, що визначають обмеження задачі, значно ускладнюють самостійне використання цих методів. Досить ефективно використовувати регулярні методи як внутрішні процедури в задачах багатовимірного математичного програмування.

Методи математичного програмування. В загальному вигляді задача математичного програмування формулюється наступним чином: визначити вектор оптимізуючих параметрів $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, який доставляє найбільше (найменше) значення обраному критерію оптимальності $F = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ в області D , яка задана обмеженнями на початкові та вихідні параметри об'єкту (процесу), що підлягає оптимізації:

$$\begin{aligned} g_i(x_1, x_2, \dots, x_m) &> 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ h_j(x_1, x_2, \dots, x_m) &= 0, \quad j = k+1, k+2, \dots, l. \end{aligned}$$

В залежності від вимог до оптимізуючих змінних x_i , $i=1, 2, \dots, m$ та виду цільової функції та функцій, що визначають область допустимих рішень, методи математичного програмування поділяються на методи лінійного програмування, методи нелінійного програмування, методи стохастичного програмування тощо.

Методи лінійного програмування. Методи лінійного програмування широко використовуються для розв'язання різноманітних оптимізаційних задач при технологічній підготовці виробництва. Можливість розрахунків за допомогою методів лінійного програмування вимагає, щоб цільова функція та функції обмежень були лінійними відносно оптимізуючих змінних. Таким чином задача лінійного програмування визначається як: визначити вектор

оптимізуючи змінних $X=X(x_1, x_2, \dots, x_m)$, яка забезпечує $\min Z(X) = \sum_{j=1}^m c_j x_j$ в області, що задана обмеженнями

$$g_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad x_j \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, m..$$

Для розв'язання таких задач використовують симплекс-метод, який має кілька різновидів – прямий симплекс-метод, симплекс-метод з оберненою матрицею, модифікований симплекс-метод, симплекс-метод з мультиплікативною матрицею тощо. Використання того або іншого методу визначається постановкою конкретної задачі оптимізації.

Методи нелінійного програмування. В більшості випадків в задачах параметричної оптимізації вимоги лінійної залежності цільової функції або функції, що визначають область допустимих рішень, не є лінійними відносно оптимізуючих змінних, крім того, на вектор оптимізуючих змінних можуть бути накладені особливі вимоги. Тому для розв'язання таких задач використовують методи нелінійного математичного програмування [5.1 – 5.6, 5.11 – 5.14]. В свою чергу ці методи поділяються на методи цілочисельного, квадратичного, параметричного, випуклого, геометричного, динамічного, сепарабельного, стохастичного програмування тощо.

В наступних підрозділах 5.2, 5.3 та 5.4 наведено опис методів нелінійного програмування, що рекомендуються для розв'язання задач параметричної оптимізації.

Методи випадкового пошуку. Методи випадкового пошуку відрізняється від детермінованих навмисним введенням елементу випадковості. Детерміновані (регулярні) методи оптимізації точніше налаштовані на специфіку досліджуваного процесу. Методи випадкового пошуку ефективні при рішенні складних задач великої розмірності з довільно заданими цільовими функціями, обмеженнями, тоді як регулярні методи, як правило, мало придатні, а інколи зовсім непридатні.

Під випадковим пошуком розуміють процес пошуку такого значення критичної оптимальності, яке близьке до оптимального і в той же час задовольняє всім обмеженням.

Розрізняють ненаправлений випадковий пошук, направлений випадковий пошук без самонавчання, направлений випадковий пошук з самонавчанням [5.23 – 5.25].

Ненаправлений випадковий пошук (метод статистичних випробувань, метод Монте–Карло) полягає в багатократному моделюванні незалежних випадкових варіантів рішень з області допустимих їх значень, в обчисленні в кожному з них цільової функції і запам'ятовуванні найближчого до екстремуму. Метод Монте–Карло належить до універсальних, оскільки дозволяє розв'язувати багатоекстремальні задачі в загальному вигляді з знаходженням найбільшого екстремуму з кількох можливих. Основний

недолік методу полягає в необхідності проведення великої кількості випробувань для отримання рішення, достатньо близького до оптимального, тобто наявність повільної збіжності до екстремуму.

Направлений випадковий пошук без самонавчання є модернізацією направленного випадкового пошуку. У основі методу лежить використання результатів пошуку найбільшого (найменшого) значення цільової функції на попередніх кроках оптимізації.

Направлений випадковий пошук з самонавчанням полягає в додаванні алгоритмів самонавчання, які корегують вектор передісторії переважно у напрямку успішного попереднього кроку або напрямку, що є зворотним попередньому невдалому кроку.

Використання методів випадкового пошуку визначається в основному наступними ситуаціями: непридатністю або відсутністю відповідних аналітичних або чисельних методів параметричної оптимізації; відсутністю можливості створення детермінованої моделі функціонування системи (процесу) та отриманням необхідної кількості інформації про систему (процес), що моделюється; наявністю великого числа випадкових параметрів в досліджуваній системі (процесі); наявністю сучасної обчислювальної техніки і відповідного програмного забезпечення.

В підрозділі 5.5 наведено опис методу направленного випадкового пошуку з самонавчанням.

Методи стохастичного програмування. У багатьох практично важливих випадках деякі з параметрів, що зустрічаються в задачах параметричної оптимізації, слід вважати не детермінованими, а випадковими. Задачі математичного програмування, в яких деякі з параметрів є випадковими величинами, розв'язуються методами стохастичного математичного програмування [5.26].

Якщо деякі з параметрів початкової задачі математичного програмування є випадковими величинами, використовується методика оптимізації математичного очікування цільової функції з врахуванням математичних очікувань випадкових величин та їх дисперсій.

Задачі стохастичного математичного програмування, в яких деякі параметри можуть бути випадковими величинами, зручно розбити на два основні класи. Перший включає ті задачі, в яких приймаються два або більше рішень в різні моменти часу, і які мають таку властивість, що на подальші рішення можуть впливати не тільки рішення, прийняті раніше, але і деякі стохастичні параметри, реалізації яких можна спостерігати, перш ніж рішення будуть ухвалені. Такі задачі є багатокроковими. Інший клас задач відноситься до однокрокових. Для задач цього класу є характерним те, що можна ухвалювати тільки одне рішення, або якщо ухвалюється декілька рішень, то реалізації випадкових параметрів не спостерігаються і вони не впливають на подальші рішення.

Для наближеного розв'язання задач стохастичного програмування часто використовується метод, який полягає в заміні всіх випадкових величин їх середніми значеннями і в подальшому розв'язанні отриманої

детермінованої задачі. В підрозділі 5.6 наведено опис розв'язання задачі стохастичного математичного програмування.

Порівняння різних методів оптимізації виконувалось з використанням таких найбільш важливих критеріїв:

- 1) час необхідний для реалізації серії обчислювальних процедур (кількість операцій та час їх виконання);
- 2) ступінь складності задачі (розмірність, кількість обмежень у вигляді нерівностей, кількість обмежень у вигляді рівностей);
- 3) точність рішення по відношенню до оптимального значення;
- 4) простота практичного використання алгоритму оптимізації (час необхідний для введення початкових даних та запису функцій в пам'ять ЕОМ);
- 5) простота програми, що реалізує алгоритм розв'язуваної задачі;
- 6) можливість рішення задач, що представляють практичний інтерес тощо.

Аналіз методів параметричної оптимізації за наведеними критеріями дозволяє зробити такі висновки:

- 1) задачі оптимізації технологічних параметрів є багатовимірні та нелінійні, тому для їх розв'язання доцільно використовувати методи нелінійного програмування;
- 2) вибір того або іншого методу нелінійного програмування визначається постановкою задачі оптимізації та параметрами, що характеризують ці задачі;
- 3) якщо цільова функція є багатоекстремальною або область допустимих рішень є розривною, то для розв'язання таких задач доцільно використовувати методи випадкового пошуку;
- 4) наявність в математичній моделі процесу (об'єкту), що оптимізується, випадкових параметрів та змінних потребує використання методів стохастичного математичного програмування.

5.2 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 [5.27 – 5.32] 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

$$\min \{f(x)/g_i(x) \geq 0, i=1,2,\dots,n\} \quad (5.1)$$

послідовністю пов'язаних з нею задач без обмежень

$$\min \{F(x) = f(x) + P_k(x) | x \in E^m\}, k=0,1,2,\dots, \quad (5.2)$$

кожна з яких може бути успішно розв'язана за допомогою раніше наведених методів безумовної оптимізації – градієнтного методу, методу найшвидшого спуску, методів Ньютона тощо.

Існують [5.2 – 5.5] два основних, в своїй основі різних підходи до побудови задач (5.2), 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 $P_k(X) \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$ для всіх $X^k \in D$. В методі штрафів рекомендують використовувати штрафну функцію такого вигляду:

$$P(X) = \sum_{i=1}^n \{\min[g_i(X), 0]\}^2, \quad P_k(X) = \frac{1}{r^k} P(X). \quad (5.3)$$

При використанні методу бар'єрів функції $P_k(x)$ визначаються так, щоб в процесі розв'язання задачі (5.2) вони «відштовхували» від границі області допустимих рішень D точки $X^k \in D$, $k=0,1,2,\dots$, які отримані одним із методів безумовної оптимізації. Тут початкова точка X^0 повинна вибиратись із множини $X \in D$. Тоді

$$P_k(X) = r^k P(X) = r^k \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i(X)}, \quad g_i(X) > 0, \quad i=1,2,\dots,n \quad (5.4)$$

або

$$P_k(X) = -r^k P(X) = -r^k \sum_{i=1}^n \ln[g_i(X)], \quad g_i(X) > 0, \quad i=1,2,\dots,n.$$

В процесі розв'язання задачі оптимізації вказаними методами штрафних функцій використовується послідовність параметрів r , що мають такі властивості:

$$r^k > 0 \quad \forall k, \quad r^k > r^{k+1} \text{ и } \lim_{k \rightarrow \infty} r^k = 0.$$

Розпочинаючи з будь якої точки X^k , $k = 0,1,2,\dots$ шляхом розв'язання задачі безумовної оптимізації можна отримати нову допустиму точку X^{k+1} , що є ближчою до оптимального рішення X^* задачі (5.1). При цьому

виробляється послідовність рішень $\{X^k\}_0^\infty$, для якої $\lim_{k \rightarrow \infty} X^k = X^*$, де k – номер ітерації.

Методи внутрішніх та зовнішніх штрафних функцій доцільно комбінувати, в результаті чого отримаємо змішаний метод розв'язання задачі опуклого програмування (5.1). В цьому випадку початкова задача оптимізації перетвориться в послідовність задач без обмежень виду:

$$\min\{F(x) = f(x) + P'_k(x) + P''_k(x)/x \in E^m\}, k=0,1,2,\dots, \quad (5.5)$$

де $P'_k(x) = \frac{1}{r^k} P'(x) = \frac{1}{r^k} \sum_{i \in I'} \{\min[g_i(x), 0]\}^2$, $P''_k(x) = r^k P'(x) = r^k \sum_{i \in I''} [g_i(x)]^{-1}$,
 $I' = \{i \in \{1, 2, \dots, n\} / g_i(x) \leq 0\}$, $I'' = \{i \in \{1, 2, \dots, n\} / g_i(x) > 0\}$.

Основи методики оптимізації методом опуклого програмування та особливості його використання при розв'язанні технологічних задач наведено в [5.27, 5.31, 5.32].

Узагальнена схема алгоритму методу опуклого програмування з використанням внутрішніх процедур Ньютона і золотого перетину представлена на рис. 5.1. Цей алгоритм програмно реалізовно і апробовано при розв'язанні задач оптимізації режимів різання [5.28, 5.29, 3.31, 5.32].

5.3 Метод ковзаючого допуску

Метод ковзаючого допуску [5.4] належить до методів, що дозволяють розв'язати задачу нелінійного програмування, яка формулюється наступним чином: мінімізувати цільову функцію $f(X)$, $X \in E^m$ при таких допущеннях:

$$\begin{aligned} h_i(X) &= 0, i = 1, 2, \dots, n; \\ g_j &\geq 0, j = m+1, m+2, \dots, l, \end{aligned} \quad (5.6)$$

де функції $f(X)$, $h(X)$ і $f(X)$ можуть бути як лінійними, так і нелінійними.

Для розв'язання такої задачі систему обмежень (5.6) запишемо в такому виді:

$$\Phi^k - T(X) \geq 0, \quad (5.7)$$

де Φ^k – значення критерію ковзаючого допуску на кожному етапі пошуку;

$T(X)$ – функціонал над множиною всіх обмежень, наданих співвідношенням (5.6).

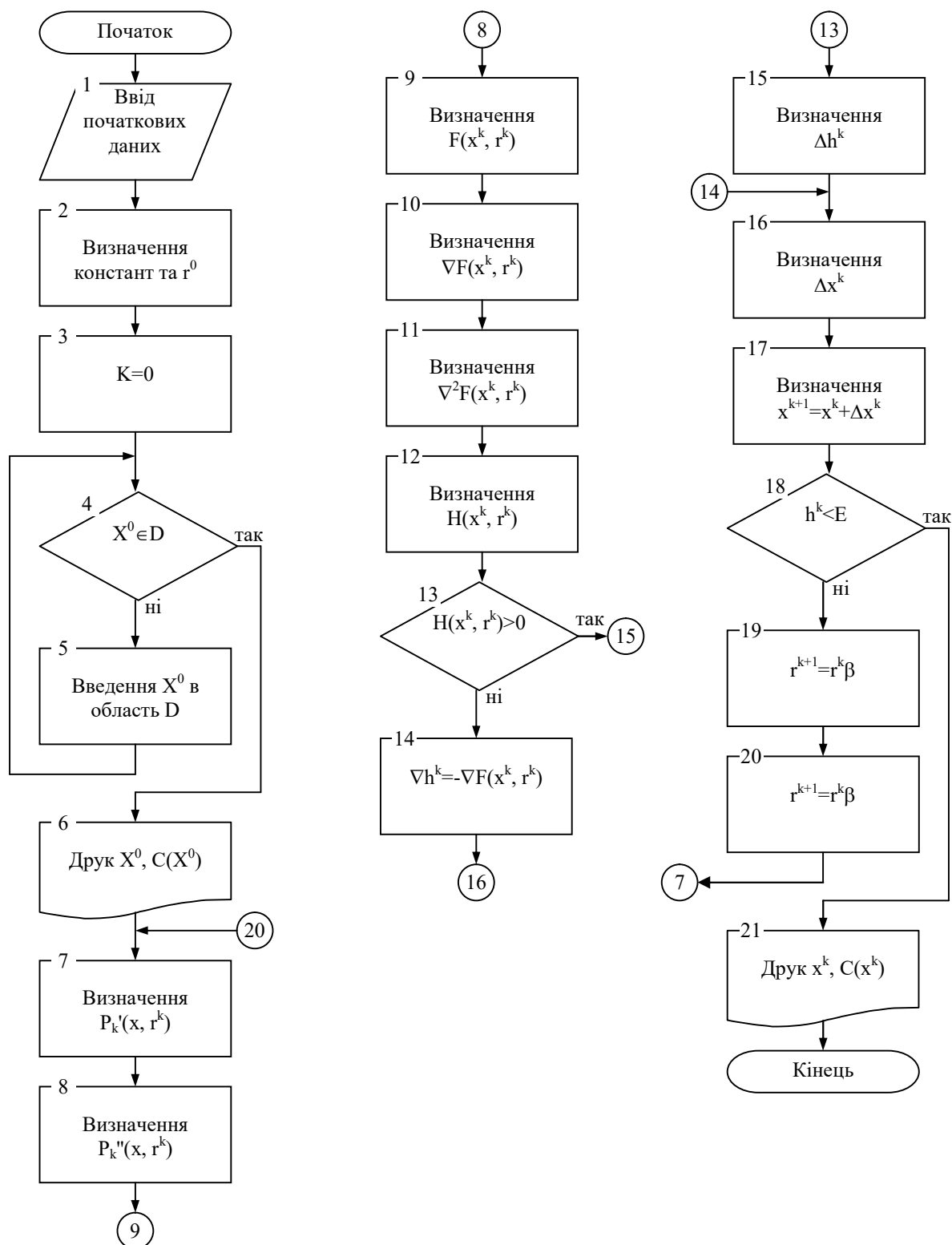


Рис 5.1. Узагальнена схема алгоритму методу опуклого математичного програмування.

Функція $\Phi^k = \Phi^k(X_{1,\dots}^k, X_{2+2}^k)$ є також критерієм для визначення моменту закінчення пошукової процедури. Одним із варіантів вибору Φ^k може бути така залежність:

$$\Phi^k = \min \left\{ \Phi^{(k-1)}, \frac{n+1}{r+1} \sum_{i=1}^{r+1} \|X_i^k - X_{r+2}^k\| \right\}, \quad (5.8)$$

$$\Phi^0 = 2(n+1)t,$$

де t – розмір початкового многогранника;

n – кількість обмежень у вигляді рівнянь;

$r = (-n + m)$ – кількість степенів вільності цільової функції $f(X)$;

$X_{r+2}^k = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^{r+1} X_{ji}^k - X_{nj}^k \right]$ – вектор, що визначає координати центру

тяжіння многогранника при $m = r$.

Друга компонента в (5.8) може бути представлена як:

$$\frac{n+1}{r+1} \left\{ \sum_{i=1}^{r+1} \sum_{j=1}^m (X_{ij}^k - X_{r+2,j}^k)^2 \right\}^{1/2} - \text{середня відстань від точок } X_i, i = 1, 2, \dots,$$

$r+1$ до центру тяжіння X_{r+2}^k в просторі E^m .

Функція Φ^k є позитивною зменшувальною функцією, яка створює послідовність

$$\Phi^0 \geq \hat{\Phi} \geq \dots \Phi^k \geq 0, \text{ тобто } \lim_{k \rightarrow X^k} \Phi^k = 0.$$

Функціонал $T(X)$ над множиною обмежень (5.8) представляється формулою:

$$T(X) = \left[\sum_{i=1}^n h_i^2(X) + \sum_{i=n+1}^l U_i g_i^2(X) \right]^{1/2}, \quad (5.9)$$

де U_i – оператор Хевісайда, що визначається наступним чином:

$$U_i = \begin{cases} 0, & \text{при } g_i(X) \geq 0, \\ 1, & \text{при } g_i(X) < 0. \end{cases}$$

Тобто $T(X)$ – це взятий з додатнім знаком квадратний корінь із суми порушених обмежень (5.6), $T(X) \geq 0$ в E^m . Вектор X^k – є допустимим, якщо $T(X^k) = 0$, майже допустимим, якщо $0 \leq T(X^k) \leq \Phi^k$ та недопустимим, якщо $T(X^k) > \Phi^k$. Величина початкового багатогранника визначається виразом:

$$t = \min \left\{ \left[\frac{0,2}{m} \sum_{i=1}^m (U_i - L_i) \right], (U_2 - L_2), \dots, (U_n - L_n) \right\}, \quad (5.10)$$

де $(U_i - L_i)$ – різниця між верхніми та нижніми граничними значеннями, які може приймати X^i .

Робота алгоритму оптимізаційного пошуку закінчується в двох випадках. Якщо $\Phi^k \leq \varepsilon$, то пошук вважається закінченим і кваліфікується як успішний.

В випадку, коли не вдається знайти допустиму точку або майже допустиму точку за допомогою мінімізуючої функції $T(X)$, то пошук завершується і виконується заміна початкової точки X^0 та (або) здійснюється перехід до іншого набору значень параметрів α, β, γ та ε . Зазвичай рекомендується приймати такі значення цих параметрів: $\alpha = 1$; $\beta = 0,5$; $\gamma = 2$; $\varepsilon = 10^{-5}$.

Для пошуку допустимих або майже допустимих точок при мінімізації $T(X)$ використовується алгоритм Нелдера і Міда, що має назву деформованого многогранника.

Розроблено алгоритм розв'язання задачі багатовимірної нелінійної оптимізації, що використовує метод ковзаючого допуску. Узагальнена схема цього алгоритму наведена на рис.5.2.

При практичній реалізації на ЕОМ багатьох методів нелінійного програмування значна доля машинного часу тратиться на те, щоб забезпечити суворе виконання умов допустимості. Алгоритм ковзаючого допуску дозволяє покращити значення цільової функції як за рахунок інформації, що утримується в допустимих точках простору рішень, так і за рахунок інформації, яку вдається одержати при проходженні через деякі точки, що лежать зовні допустимої області, але є близькими до допустимих. Інтервали, в межах яких точки можна вважати майже допустимими, в ході оптимізаційного пошуку поступово скорочуються так, що в границі (по мірі наближення до рішення задачі нелінійного програмування) в системі співвідношень (5.6) враховуються тільки допустимі точки X . При такій стратегії оптимізаційного пошуку задача (5.6) замінюється більш простою задачею (5.7). Таким чином, при рішенні такої задачі безумовної мінімізації досягається висока ступінь ефективності обчислювальних процедур.

5.4 Метод направленного випадкового пошуку з самонавчанням

Метод направленного випадкового пошуку базується на поєднанні методів статистичних випробувань та статистичного градієнту [5.23 – 5.25]. Він дозволяє розв'язати задачу нелінійного математичного програмування, яка у загальному вигляді може бути сформульована наступним чином: знайти вектор оптимізації $X^* = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в області D , що представлена обмеженнями:

$$\varphi_i(X^*) \geq 0, j = 1, 2, \dots, m, f(X^*) = \sup f(X), \quad (5.11)$$

де $f(X)$ і $\varphi_j(X)$ – функції n - вимірному вектора, що задовольняє умовам безперервності у всій області зміни змінних x_i .

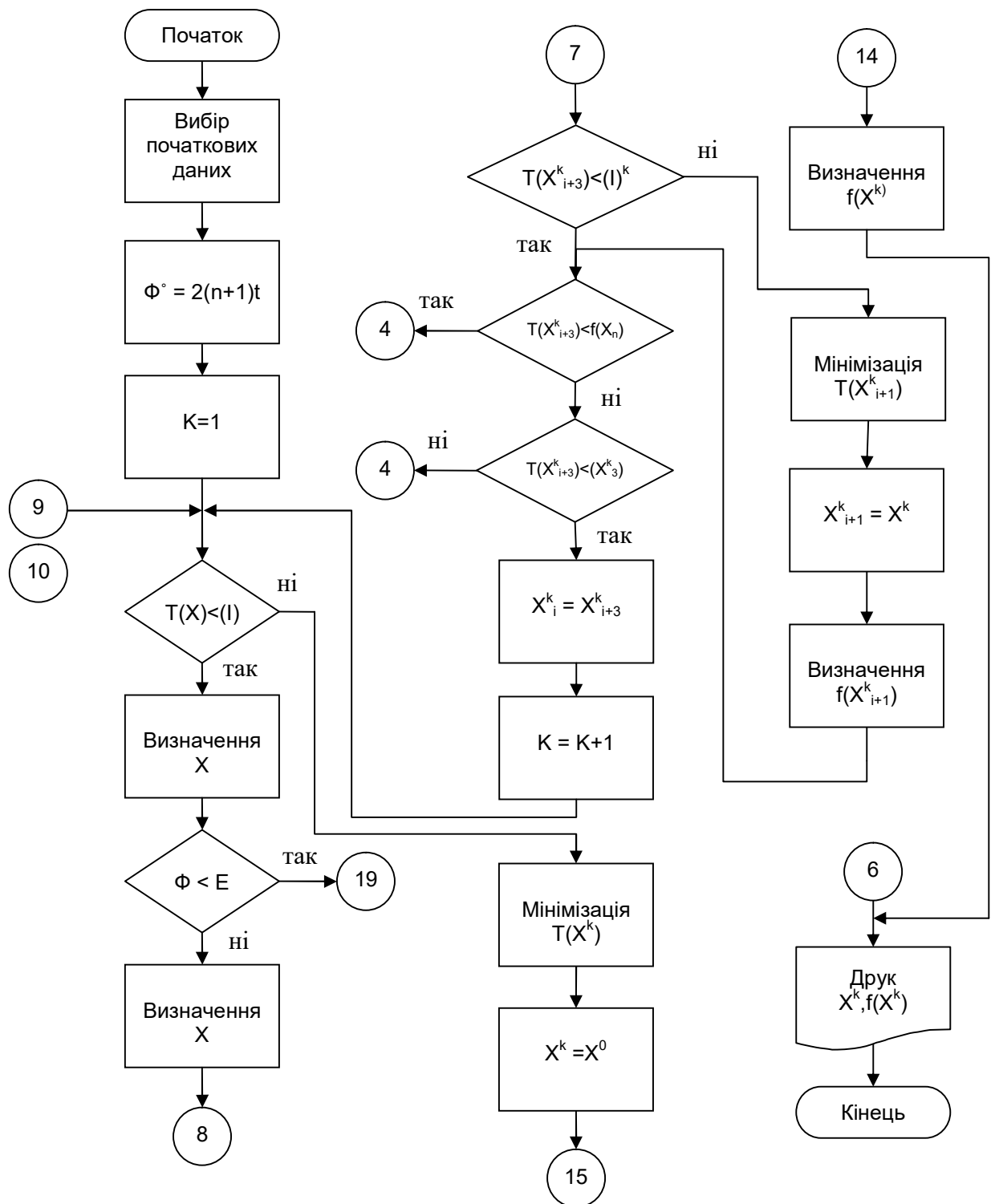


Рис 5.2. Узагальнена схема алгоритму оптимізації методом ковзаючого допуску.

Суть методу випадкового пошуку та особливості його використання наведено в [5.33 – 5.35].

Узагальнена схема алгоритму оптимізації методом направленного випадкового пошуку з самонавчанням наведена на рис. 5.3.

Згідно цього алгоритму 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 $X^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, якщо значення x_i^0 вираховуються, або $X^0 = X_0^*$, якщо початковий вектор X_0^* задається на початку обчислень;

5) визначається значення функції, що оптимізується $H^0 = H(X^0)$;

6) у випадку використання режиму „вільного пошуку” визначається послідовність k_1 випадкових векторів $X_{k_1}^0$, де $k_1 = 1, 2, \dots, l_2$ в області D , координати яких мають рівномірний розподіл в цій області. Для кожного $X_{k_1}^0$ вираховуються значення оцінки функції якості $H_0^{k_1} = H(X_{k_1}^0)$, які порівнюються з H_0 , вибирається екстремальне значення $H_0^* = \max\{H_0^{k_1}; H_0\}$ та знаходиться вектор X_0^* , для якого $H_0^* = H(X_0^*)$. 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 $k_2 = 1, 2, \dots, l_3$, 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 $H^{k_2} = H(X^{k_2})$, знаходиться максимальне значення $H^* = \max\{H^{k_2}, H(X_0^*)\}$ серед векторів, що одержані при випадковому пошуку, та визначається вектор X^* , для якого $H^* = H(X^*)$;

8) вираховуються нормовані компоненти градієнта функції відносно вектора X_0 за формулою:

$$y_i = [\sum g_i^2]^{-1/2},$$

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 $H^\Gamma = H(X^\Gamma)$;

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 $H_l^* = H(x_{i(l-1)}^*)$. 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;

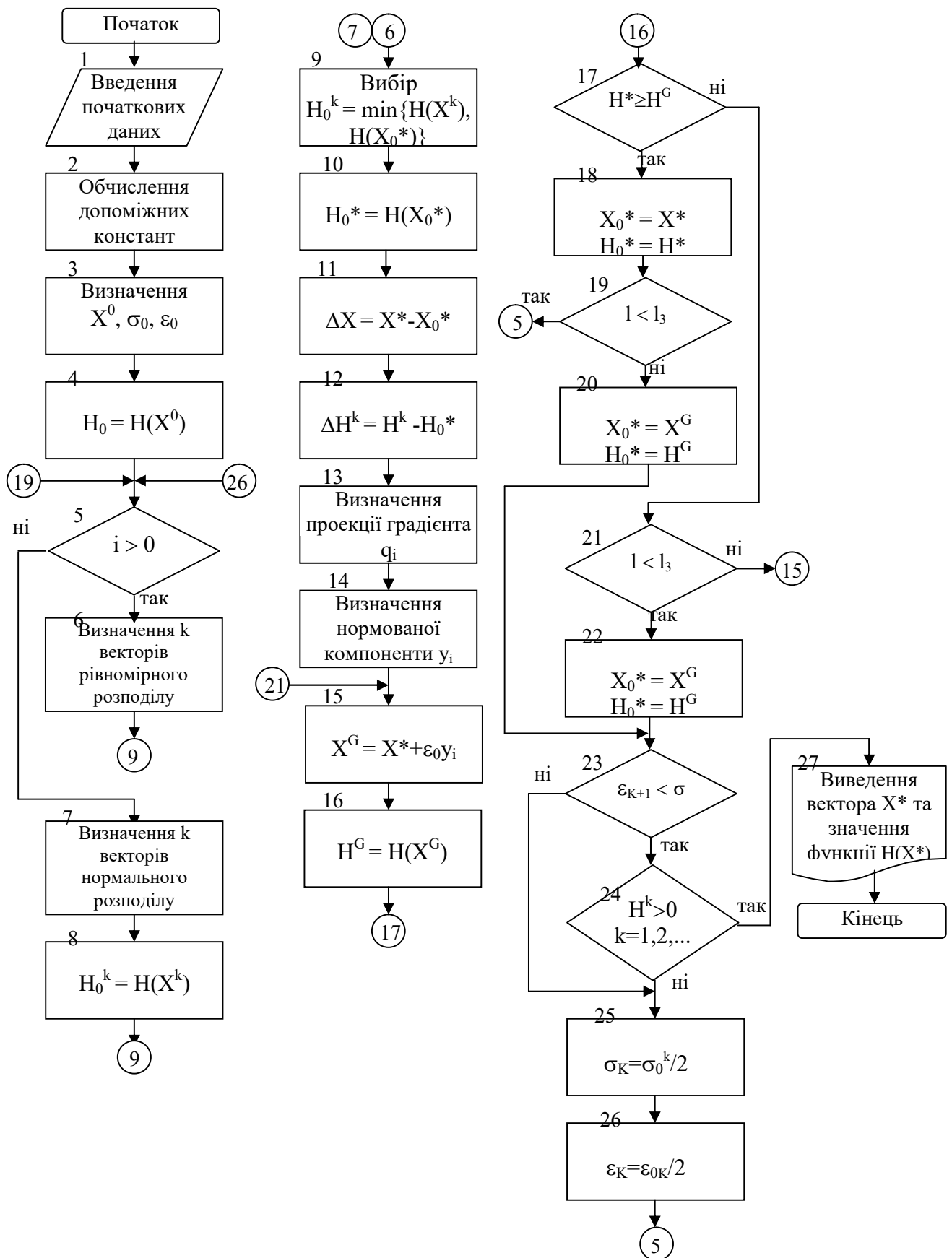


Рис. 5.3. Узагальнена схема алгоритму направленої випадкової пошуку з самонавчанням.

11) здійснюється зменшення області вибору випадкових векторів та зменшення кроку градієнта. При цьому крок по градієнту на k -му циклі звуження області порівнюється з заданою точністю δ отриманого 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 $k = 1, 2, \dots, N$, 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 багатоекстремальну 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.

5.5 Метод стохастичного математичного програмування

Задача стохастичного програмування формулюється 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 формулюється наступним чином: знайти вектор оптимізуючи змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, який доставляє мінімальне (максимальне) значення цільовій функції $f(X)$, в області допустимих рішень, що задана сукупністю обмежень $g_j(X) \geq b_j, j=1,2,\dots,m$. На відміну від звичайної детермінованої постановки задачі оптимізації в цій задачі деякі змінні та параметри є випадковими величинами.

Для розв'язання такої задачі можна [5.20] 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 \bar{X} середніх значень x_i

$$f(x) = f(\bar{x}) + \sum_i \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \cdot (x_i - \bar{x}_i) + \dots \quad (5.12)$$

Якщо середньоквадратичні відхилення величини x_i малі, то членами вищого порядку в розкладанні можна знехтувати і тоді

$$f(x) \approx f(\bar{x}) - \sum_i \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \cdot \bar{x}_i + \sum_i \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \cdot x_i = f_1(\bar{x}) \quad (5.13)$$

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:

$$\bar{f}_1 = f(\bar{x}), \quad \sigma_{c_1}^2 = \sum_i \left(\left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{\bar{x}} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2 \quad (5.14)$$

При рішенні задачі стохастичної оптимізації можливі два випадки.

1. Будується нова цільова функція у вигляді

$$f_2 = a_1 \cdot \bar{f}_1 + a_2 \cdot \sigma_{c_1}, \quad (5.15)$$

де a_1 і a_2 – додатні сталі, такі, що визначають відносну важливість складових \bar{f}_1 і σ_{c_1} .

2. Нова цільова функція приймається аналогічно випадку 1, а до обмежень завдання додається умова $\sigma_{c_1} \leq a_3 \cdot \bar{f}_1$, 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 [5.20] таким чином: $P\{g_j(x) \geq b_j\} \geq p_j$.

З урахуванням заміни $y_j = \Phi_{j(x)} = g_j(x)$, j -те обмеження перетвориться до

вигляду
$$\int_0^\infty P(y_j) \cdot dy_j \geq P_j,$$

де $P(y_j)$ – щільність вірогідності випадкової змінної y_j . Розкладаючи функцію $\Phi_j(x)$ в ряд в околиці вектора \bar{X} середніх значень x_j і залишаючи тільки лінійні члени, отримаємо

$$y_j = \Phi_j(x) \approx \Phi_j(\bar{X}) + \sum_i \left. \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right|_{\bar{X}} \cdot (x_i - \bar{x}_i), \quad (5.16)$$

де y_j – нормально розподілена випадкова величина. Її середнє значення та середньоквадратичне відхилення визначаються згідно формул:

$$\bar{y}_j = \Phi_j(\bar{X}), \quad \sigma_{y_j} = \sqrt{\sum_i \left(\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right|_{\bar{X}} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2} \quad (5.17)$$

Шляхом заміни змінною $\theta = \frac{y_j - \bar{y}_j}{\sigma_{y_j}}$

і з урахуванням того, що j -те обмеження перетворюється до вигляду

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{\left(\frac{\bar{y}_j}{\sigma_{y_j}} \right)}^{\infty} e^{-\frac{\theta^2}{2}} d\theta \geq \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{\psi(p_j)}^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (5.18)$$

де величина $\psi(p_j)$ залежить від рівня довірчої вірогідності p_j . Звідси отримаємо j -те обмеження в наступному вигляді

$$-\frac{\bar{y}_j}{\sigma_{y_j}} \leq \psi(p_j) \quad \text{або ж} \quad -y_j - \psi(p_j) \cdot \sigma_{y_j} \leq 0, \quad (5.19)$$

тоді

$$g_j(\bar{X}) = \psi(p_j) \cdot \sqrt{\sum_i \left(\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right|_{\bar{X}} \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2} \geq \bar{b}_j. \quad (5.20)$$

Методика стохастичного програмування програмно реалізована та апробована при розв'язанні технологічних задач [5.33 – 5.35].

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.

$$C = b_n + \frac{\pi \cdot d \cdot l}{10^3 \cdot V \cdot S} \cdot i \cdot \left[\alpha_T + \frac{M(K_u)}{T} \right], \quad (5.21)$$

$$T = \frac{h}{60 \cdot V} \cdot e^{K_T}$$

$$K_T = 11,8772658 + 0,243912 \cdot \frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)} - 25,44754 \cdot \frac{f \cdot h}{V} + 4,0218524 \cdot \frac{A}{h} -$$

$$-0,0023003 \cdot \left[\frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)} \right]^2 - 0,1955191 \cdot \frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)} \cdot \frac{f \cdot h}{V} - 0,5340685 \cdot \frac{H_u(\theta)}{H_g(\theta)} \cdot \frac{A}{h} +$$

$$+ 242,0981 \cdot \left(\frac{f \cdot h}{V} \right)^2 - 97,414781 \cdot \frac{f \cdot A}{V} + 65,55484 \cdot \left(\frac{A}{h} \right)^2$$

Значення оптимізуєючих змінних визначаються із області допустимих рішень, яка задається обмеженнями на такі параметри:

- а) продуктивність процесу обробки $P \geq P_{mp}$;
- б) точність обробки $\Delta \leq \delta$;
- в) якість поверхневого шару:
- г) шорсткість обробленої поверхні $Ra \leq Ra_{mp}$ або $Rz \leq Rz_{mp}$;
- д) глибина наклепаного шару $h_c \leq h_{c \text{ доп}}$;
- е) залишкові напруги $\sigma_{ост} \leq \sigma_{ост. \text{ доп}}$;
- ж) пружний стан в різальному інструменті $\sigma_\eta \leq [\sigma_\eta]$; $\sigma_{r.m} \leq [\sigma_\eta]$;
- з) втомну (циклічну) міцність інструменту $T_{np} \geq m_1 \cdot T$.

Крім того, параметри процесу обробки (шуканий вектор) повинні забезпечувати стійке різання, тобто $r_1 \leq R \leq r_2$, 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 оптимізуєючих змінних, що доставляє найменше значення цільової функції

$$C_2 = a_1 \cdot C(\bar{X}) - a_2 \cdot \sqrt{\left(\left. \frac{\partial C}{\partial T} \right|_{\bar{T}} \cdot \sigma_T \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial C}{\partial M(K_u)} \right|_{M(K_u)} \cdot \sigma_{M(K_u)} \right)^2} \quad (5.22)$$

при імовірнісних обмеженнях з довірчою ймовірністю:

- за продуктивністю обробки

$$\Pi(X) + \psi(P_j) \cdot \frac{\partial \Pi}{\partial T} \bigg|_{\bar{T}} \cdot \sigma_T \geq \Pi_{mp};$$

– за пружним станом в різальному клині інструменту

$$\sigma_\eta - \psi(P_j) \cdot \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial \sigma_i} \bigg|_{\sigma_i} \cdot \sigma_\sigma \leq \frac{\sigma_{-\%o}}{n_{-\%o}}; \quad \sigma_{rm} - \psi(P_j) \cdot \frac{\partial \sigma_{rm}}{\partial \sigma_{\%ai}} \bigg|_{\sigma_{\%ai}} \cdot \sigma_{\sigma_1} \leq \frac{\sigma_{\%ai}}{n_{\%o}};$$

– за втомною міцністю різального інструменту

$$T_{\cdot p} + \psi(P_j) \cdot \frac{\partial T_{\cdot p}}{\partial N} \bigg|_{\bar{N}} \cdot \sigma_{NN} \geq [T - \psi(P_j) \cdot \sigma_T] \cdot m_1;$$

– за точністю обробки

$$\Delta - \psi(P_j) \cdot \left[\left(\frac{\partial \Delta}{\partial P_x} \bigg|_{\bar{P}_x} \cdot \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta}{\partial P_y} \bigg|_{\bar{P}_y} \cdot \sigma_y \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta}{\partial P_z} \bigg|_{\bar{P}_z} \cdot \sigma_z \right)^2 \right]^{1/2} \leq \delta \quad (5.23)$$

– за стійкістю процесу різання:

$$a) \frac{P_0}{S \cdot \text{tg} \varphi} + \psi(P_j) \cdot \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P_x} \bigg|_{\bar{P}_x} \cdot \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_y} \bigg|_{\bar{P}_y} \cdot \sigma_y \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_z} \bigg|_{\bar{P}_z} \cdot \sigma_z \right)^2 \right]^{1/2} \leq \delta;$$

$$б) \frac{P(T)}{S \cdot \text{tg} \varphi} - \psi(P_j) \cdot \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P_x} \bigg|_{\bar{P}_x} - \sigma_x \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial P_y} \bigg|_{\bar{P}_y} - \sigma_z \right)^2 \right]^{1/2} \leq r_2;$$

– за ефективною потужністю верстата

$$N_{pez} - \psi(P_j) \cdot \frac{\partial N_{pez}}{\partial P_z} \bigg|_{\bar{P}_z} - \sigma_z \leq N_{zo} \cdot \eta \cdot K_n.$$

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.

5.6 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

$$\min (\text{ або } \max) F(X), \quad X \in D, \quad (5.24)$$

де $F(X)$ – скалярна цільова функція;

$X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ – 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

$$C(X) = C(f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)) \quad (5.25)$$

де $f_i(X)$ – вираз i -го часткового критерію оптимальності, $i=1, 2, \dots, n$;

n – кількість часткових критеріїв, що використовуються при багатокритеріальній оптимізації.

Таким чином, задача багатокритеріальної оптимізації узагальнює звичайну задачу оптимізації на випадок, коли $n > 1$, де передбачається, що всі часткові критерії мінімізуються [5.36 – 5.39]. Тоді задачу багатокритеріальної оптимізації можна записати у вигляді

$$\min f_i(X), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.26)$$

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 $f_i(X)$, $i = 1, 2, \dots, n$. 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 [5.36, 5.40 – 5.42].

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 [5.43]

$$\min f_1(X), X \in D.$$

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

$$C(X) = C(f_1, f_2, \dots, f_n), \quad (5.27)$$

що є функцією початкових часткових критеріїв, причому мінімум цього критерію повинен відповідати розв'язанню багатоекстремальної задачі [5.25, 5.44, 5.45]. 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

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{f_i(X)}{f_{i \min}}. \quad (5.28)$$

Для задоволення вимог інваріантності до зміни масштабу часткових критеріїв вводиться новий параметр – максимальне значення критерію $f_{i \max}$. Тоді всім вищенаведеним вимогам відповідає така глобальна цільова функція

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{f_i(X) - f_{i \min}}{f_{i \max} - f_{i \min}} \right), \quad (5.29)$$

де n – кількість часткових критеріїв, що використовуються при багатокритеріальній оптимізації;

α_i – вага i – того критерію;

$f_i(X)$ – вираз i – того критерію оптимальності;

$f_{i \min}$ – найменше значення i – того критерію;

$f_{i \max}$ – 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

$$\alpha_i = \frac{\alpha_i^1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^1}, \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (5.30)$$

Інший спосіб, на думку фахівців, зручніший для експертів і тому є більш практичним. Відповідно до цього способу експерти для кожної з декількох пар ситуацій

$$X_i^1 \text{ та } X_i^2, i=1,2,\dots,p$$

ставлять у відповідність один з трьох видів відносин: еквівалентність, перевага і відсутність переваги. В результаті цього отримуємо систему з p рівностей 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 [5.43].

Вказана методика багатокритеріальної оптимізації була застосована при дослідженні матеріалів покриттів, технологій їх нанесення і умов експлуатації [5.46 – 5.50].

В дослідженнях, де використовувалися два критерії оптимальності - інтенсивність зношування $J(X)$ і коефіцієнт тертя $\mu(X)$ – при рівності впливу на нову цільову функцію $C(X)$ цих часткових критеріїв, тобто при $\alpha_i = 1, i = 1, 2$, 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 5.29.

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:

$$\Pi = \left\{ \tau \left[1 + \frac{t_{зм}}{T} + \frac{m_2 t_{зм}}{T m_1} \right] + t_{\partial} \right\}^{-1}, \quad (5.31)$$

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 кількості переточувань;

t_{∂} – додатковий час;

T – період стійкості різального інструменту.

Частковий критерій – собівартість процесу механічної обробки різальним інструментом представляли наступним чином:

$$C = b_n + \tau \left[a_T + \frac{m_2}{T} \right], \quad (5.32)$$

де b_n – витрати, які пов'язані з простоем 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: $Ra \leq Ra_{зад}$, де Ra – шорсткість оброблюваної поверхні, яка визначалась за формулою

$$Ra = (2,23351 - 0,25009x_1 - 0,41903x_2 - 0,2549x_3 - 0,57639x_4)^2, \quad (5.33)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 – кодовані значення типу покриття, глибини різання, подачі та швидкості різання відповідно, які визначаються як

$$x_1 = \frac{\Pi - 4}{3}, \quad x_2 = \frac{t - 0,25}{0,15}, \quad x_3 = \frac{s - 0,35}{0,25}, \quad x_4 = \frac{V - 123,6}{65,5};$$

– режими різання (число обертів і подача) мають бути в межах кінематичних можливостей металорізального верстата: $s_{min} \leq s \leq s_{max}$; $n_{min} \leq n \leq n_{max}$, 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 – $\frac{h_{max}}{I} \leq T$, де h_{max} – максимальне значення розмірного зношування інструменту, а I – швидкість зношування інструменту, яка визначається за формулою

$$I = 4,4022 \cdot 10^{-9} \cdot V^{3,531} s^{-0,922} t^{-1,4556} \tau^{0,0644}, \quad (5.34)$$

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 – $P(X)$ [5.50]. Характер залежностей часткових критеріїв оптимальності Π і C від швидкості різання V наведено на рис.5.4.

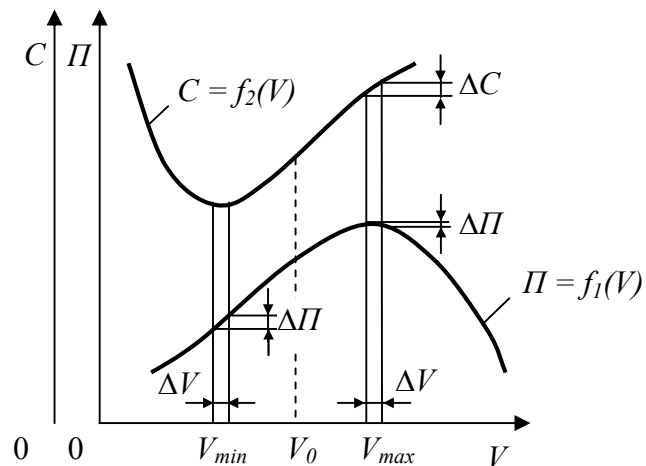


Рис. 5.4. Характер залежностей критеріїв оптимізації Π і C від швидкості різання V [5.51].

Загальний вигляд комплексного критерію представляли як:

$$\max_{X \in D} P(X) = \max(\alpha_1 \frac{\Pi(X) - \Pi_{min}}{\Delta \Pi} - \alpha_2 \frac{C(X) - C_{min}}{\Delta C}), \quad (5.35)$$

де Π_{min} , C_{min} – мінімальні значення продуктивності та собівартості обробки відповідно, а $\Delta \Pi$ та ΔC – різниці між найбільшими та найменшими значеннями продуктивності та собівартості процесу різання.

Часткові критерії оптимальності – продуктивність процесу різання $\Pi(X)$ і технологічна собівартість $C(X)$ визначали згідно формул 5.31 та 5.32. При рівності впливу на нову цільову функцію $P(X)$ цих часткових критеріїв, тобто при $\alpha_i = 1$, $i = 1, 2$, а також з урахуванням граничних значень вихідних

параметрів процесу різання, вираз комплексної цільової функції мав такий вигляд:

$$\max P(X) = \left(\frac{P(X) - 0,089945}{0,21955} - \frac{C(X) - 0,54730}{3,28705} \right) \quad (5.36)$$

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 5.1. наведені результати розв'язання задач оптимізації режимів токарної обробки конструкційних сталей інструментом з вакуум-плазмовими покриттями дискретного типу.

Таблиця 5.1

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	T15K6	TiN	3,5	0,2	1,0	94
Сталь 45	T15K6	Ti(C,N)	3,7	0,2	1,0	97
Сталь 45	T15K6	(Ti,Al)N	3,8	0,2	1,0	102
Сталь 40Х	T15K6	TiN	2,0	0,15	0,5	72
Сталь 40Х	T15K6	Ti(C,N)	2,16	0,15	0,5	76
Сталь 40Х	T15K6	(Ti,Al)N	2,25	0,15	0,5	81
ШХ15	T15K6	TiN	1,38	0,06	0,3	68
ШХ15	T15K6	Ti(C,N)	1,46	0,06	0,3	70
ШХ15	T15K6	(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) щодо впливу кожного часткового критерію оптимізації на комплексний критерій. Методика багатокритеріальної оптимізації [5.51, 5.52] є простою, легко

реалізується на ЕОМ і, як показало її застосування на практиці, є достатньо ефективною.

Висновки до розділу

Аналіз задач параметричної оптимізації, розв'язуваних при технологічній підготовці виробництва показав, що більшість з них є багатовимірними нелінійними задачами математичного програмування. Вибір методу їх розв'язання залежить від постановки задачі оптимізації, розмірності розв'язуваної задачі, виду цільової функції і залежностей, що визначають область допустимих рішень.

Запропонований метод опуклого програмування розв'язання є достатньо універсальним методом розв'язання нелінійної задачі математичного програмування, коли цільова функція та функції обмежень є нелінійні відносно оптимізуючих змінних. Він враховує обмеження як у вигляді нерівностей, так і рівнянь, та не має обмежень по кількості оптимізуючих змінних.

Метод ковзаючого допуску наряду з перевагами методу опуклого програмування не має таких суворих вимог до збіжності ітераційного процесу. Метод дозволяє покращити значення цільової функції як за рахунок інформації, що отримується в допустимих точках простору рішень, так і за рахунок інформації, яку вдається одержати при проходженні через деякі точки, що лежать зовні допустимої області, але є близькими до допустимих. Інтервали, в межах яких точки можна вважати майже допустимими, в ході оптимізаційного пошуку поступово скорочуються так, що в границі (по мірі наближення до шуканого рішення задачі нелінійного програмування) отримуємо допустиме рішення задачі оптимізації.

Розв'язати задачу багатовимірної параметричної оптимізації, що не залежить від вигляду цільової функції, а також при наявності розривної області допустимих рішень дозволяє направлений випадковий пошук з самонавчанням. Перевагою цього методу є також можливість знаходження глобального екстремуму цільової функції.

Запропонована методика багатокритеріальної оптимізації дозволяє врахувати одночасно декілька критеріїв при розв'язанні мінімаксних задач. Метод враховує вагомість кожного часткового критерію оптимальності, яка визначається на основі експертних оцінок.

Застосування наведеної методики розв'язання задачі стохастичного програмування дозволяє врахувати в задачах параметричної оптимізації випадковий характер параметрів та змінних в математичній моделі (в цільовій функції та в функціях обмежень). Перевагою запропонованої методики розв'язання задачі стохастичного програмування є можливість використання детермінованих методів нелінійного програмування, що наведені в даному розділі.

Перелік посилань до розділу 5

- 5.1. Хедли Дж. *Нелинейное и динамическое программирование*. – М.: Мир, 1967. – 470 с.
- 5.2. Фиакко А., Мак-Кормик Г. *Нелинейное программирование: Методы последовательной безусловной минимизации*. – М.: Мир, 1972. – 240 с.
- 5.3. Полак Э. *Численные методы оптимизации*. – М.: Мир, 1974. – 376 с.
- 5.4. Химмельблау Д. *Прикладное нелинейное программирование*. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- 5.5. Зангвилл У.И. *Нелинейное программирование*. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- 5.6. Аоки М. *Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования*. Пер. с англ. – М.: Наука, 1977. – 334 с.
- 5.7. Васильев Ф.П. *Методы решения экстремальных задач*. – М.: Наука, 1981. – 400 с.
- 5.8. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. *Практическая оптимизация*. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
- 5.9. Реклейтис Г., Рейвиндрон А., Рэгсдел К. *Оптимизация в технике: В 2-х т. Т. 2* – М.: Мир, 1986. – 320 с.
- 5.10. Цыпкин Я.З. *Методы оптимизации сложных систем*. – М.: Наука, 1987. – 168 с.
- 5.11. Венцель Е.С. *Исследование операций. Задачи, принципы, методология*. – М.: Высшая школа, 2001. – 208 с.
- 5.12. Мину М. *Математическое программирование: Теория и алгоритмы*. – М.: Наука, 1990. – 448 с.
- 5.13. Зайченко Ю.П. *Дослідження операцій*. – Київ: ВОПІЛ, 2001. – 684 с.
- 5.14. Таха Х.А. *Введение в исследование операций*. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 912 с.
- 5.15. Zietarski S. *Anwendung mathematischer Modelle zum Optimieren der spanenden Fertigung*. VDI-Z, 1975, 117, N6. – P. 1–5.
- 5.16. Ham J., Faria-Gonzalez. *Production optimization method (POM) using a digital computer*. Adv. Mach. Tool Des. and Res., 1970, Vol A. Oxford e.a., 1971. – P. 493–507.
- 5.17. Bhattacharyya A., Faria-Gonzalez R., Ham J. *Regression analysis for redichting surface finish and its application in the determination of optimum machining conditions*. Trans ASME, 1970, N3. – P. 177–180.
- 5.18. Iwata K., Murotsu Y., Ohba F., Iwatsubo T., Takemori H. *Математическое определение оптимальных режимов резания*. //Сэймицү кикай, J. Jap. Soc. Precis. Eng., 1975, 41, №5. – P. 420–425
- 5.19. Iwata K., Miotsu Y., Iwatsubo T., Fujii S. *Aprobalistic approach to the determination of the optimum cutting conditions*. Trans ASME, 1972, №4, 894. – P. 1099–1107.

5.20. Wu S.M., Ermer D.S. Maximum profits the criterion in the determination of the optimum machining conditions. *Trans ASME*, 1966, №88. – P. 435–442.

5.21. Hitomi K. Оптимизация многоступенчатой системы механической обработки. Анализ оптимальных режимов резания для поточной линии. *Trans ASME*, 1971, №4, B98.

5.22. Hitomi K. Оптимизация систем механической обработки. “Кикай-но нэнкю”, *Sei Mach.*, 1973, 25, № 3. – P. 373–377.

5.23. Растрюгин Л.А. Статистические методы поиска. – М.: Наука 1968. – 367 с.

5.24. Алгоритмы и программы случайного поиска / Под ред. Л.А. Растрюгина. – Рига: Зинатне, 1969. – 374 с.

5.25. Растрюгин Л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974. – 630 с.

5.26. Юдин Д.Б. Задачи и методы стохастического программирования. – М.: Сов. радио, 1979. – 392 с.

5.27. Соломенцев Ю.М., Остафьев В.А., Выслоух С.П. и др. САПР. Типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов одноинструментальной обработки материалов резанием. Методические рекомендации МР 119-85. – М.: ВНИИНМАШ, 1985. – 120 с.

5.28. Остафьев В.А., Выслоух С.П., Антонюк В.С. Оптимизация обработки лезвийным инструментом. // Сб. «Современные пути повышения производительности и точности металлообрабатывающего оборудования технологических процессов в машиностроении», Изд. ЦИНТО МАШПРОМ, Москва, 1980. – С. 78 – 82.

5.29. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Выслоух С.П. Вопросы оптимизации и адаптации процесса резания материалов. //Резание и инструмент. Респ. Межвед. Темат. Научн. - техн. сборник. -Харьков, Вища школа, 1981, вып. 26.

5.30. Выслоух С.П. Определение технологических параметров новых конструкционных материалов методом математического моделирования. //Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. Выпуск 41, 2001. – С.178–185.

5.31. Antoniouk V., Ostafjev V., Vislouch S. Parameteroptimierung Spanender Bearbeitungsverfahren mit Methoden der Warscheilichkeitrechnung // "Fachtagung AUPRO – 84".– Karl-Marx-Stadt: Verlag Technische Hochschule.– 1984. – S. 187–190 (німецькою мовою).

5.32. Выслоух С.П. Оптимизация при технологической подготовке машиностроительного производства. //Сб. “Резание и инструмент в технологических системах”. Международнй научно-технический сборник. Выпуск 54. Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 57–63.

5.33. Антонюк В.С., Выслоух С.П., Загоров С.В. Вероятностен подход при параметризната оптимизация на металообработвалунте процеси // Сб. "Ювелейна научна сесия посвтана на 20 години от съезването ВМЭИ".– Варна : Изд-во – НИСИ.– 1983. – С. 11–19 (болгарською мовою).

5.34. Антонюк В.С., Выслоух С.П. Вероятностный подход к параметрической оптимизации процесса резания труднообрабатываемых материалов // Оптимизация процесса резания жаро-и особо прочных материалов. Межвузов. науч. сб. – Уфа: Изд-во Уфим. авиацион. ин-та. – 1986. – С. 25–32.

5.35. Антонюк В.С., Выслоух С.П. Вероятностный подход к оптимизации процесса резания // Технология и автоматизация машиностроения. Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Київ: Техніка. – 1987. Вып. 39. – С. 3–9.

5.36. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981. – 111 с.

5.37. Масленников И.А., Соколов Ю.А. Структурно-параметрическая оптимизация токарной операции с использованием многоцелевой функции. // СТИН, 1997, №1. – С. 23-26.

5.38. Засядько А.А. Два этапа гибкой адаптации в задачах многокритериальной оптимизации. / Вісник ЧДТУ, 2002, № 2. – С.14-17.

5.39. Казаков Ю.М., Надуваев В.В. Формализация процедур выбора оптимального метода обработки на основе многокритериальной оценки технологических показателей. / Сучасне машинобудування № 3–4 (5–6), 2000. – С. 79–84.

5.40. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – 256 с.

5.41. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. – К.: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. – 274 с.

5.42. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Навч.-метод. посіб. – К.: ІВЦ „Політехніка”, 2001. – 88 с.

5.43. Выслоух С.П. Многокритериальная оптимизация в технологических расчетах. //Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ “ХПІ” – Харків, 2001. –Вип. 1(4). – С. 94–98.

5.44. Волкович В.Л. Принятие сложных решений для объектов с иерархической структурой. // Сложные системы управления. – К.: Наукова думка, 1968, вып. 4. – С. 25–36.

5.45. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1971. – 384 с.

5.46. Самотугин С.С., Мазур В.А., Антонюк В.С., Выслоух С.П. Оптимизация режимов плазменной обработки инструментальных сталей с оплавлением поверхности. //Современные проблемы и перспективы развития станко-инструментального производства и совершенствования подготовки кадров: Материалы международной научно-методической конференции 8-11 сентября 2003г., г. Мариуполь. – Мариуполь: Приазовский государственный технический университет, 2003. – С. 49–52.

5.47. Антонюк В.С., Выслоух С.П., Мазур В.А., Самотугин С.С. Оптимизация технологических параметров процесса формирования

упрочняючих покриттів. //Технологические системы. Научно-технический журнал. №4(20), 2003. – С.44–48.

5.48. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мірненко В.І. Оптимізація технологічного процесу нанесення вакуум-плазмових покриттів за критеріями короткочасної статичної міцності та пластичності. //Технологические системы. Научно-технический журнал. № 2(22), 2004. – С. 37–41.

5.49. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мирненко В.И., Рутковский А.В. Определение оптимальной структуры дифференциальных покрытий. Материалы 4-й международной научно-технической конференции. 25–27 мая 2004 г., Ялта – Киев: АТМ України, 2004. – С. 20–24.

5.50. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Мірненко В.І., Рутковський А.В. Багатокритеріальна оптимізація технологічних параметрів формування вакуум-плазмових покриттів // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси.: ЧДТУ., 2004. – Вип. № 2. – С. 71–76.

5.51. Патент України № 52846 МКВ В23Q15/00. Спосіб оптимізації процесу різання /Антонюк В.С., Вислоух С.П. – Заявлено 26.01.1987. Опубл. 15.01.2003. – Бюл. № 1.

5.52. Деклараційний патент на корисну модель. № 16732 UA, В23Q 15/00. Спосіб визначення оптимальних технологічних параметрів обробки конструкційних матеріалів. / Вислоух С.П., Волошко О.В., Філіппова М.В. Бюл. № 8, 2006.

РОЗДІЛ 6

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Розробка методів моделювання та оптимізації роботи виробничих систем є перспективною науково-технічною задачею. Вона має велике значення, оскільки практичне застосування оптимізаційних методів для створення оптимальної структури виробничої системи дозволить зменшити витрати на виробництво, а отже знизити собівартість виготовлення виробів, не вкладаючи значних коштів в переоснащення обладнання, розробку технологічного оснащення тощо.

Для розв'язання цієї задачі в даному розділі теоретично обґрунтовано і практично реалізовано математичні методи моделювання виробничих систем, доведено адекватність математичних моделей та оптимізаційних методів, а також вибрано раціональні методи оптимізації та створено програмне забезпечення, яке реалізовувало вибрані методи на практиці.

З цією метою в розділі виконано аналіз методів моделювання і оптимізації виробничих технологічних систем, вибрані найбільш ефективні методи розв'язання даних задач для дискретного виробництва [6.1 – 6.11].

Розглянуто основні положення нескінченнозначної логіки та порядкових визначників, на яких ґрунтується структурно-логічний підхід до дослідження складних систем, до яких відносяться і виробничі системи в приладобудуванні. Наведено алгоритми, що реалізують даний метод моделювання виробничих систем та подальшу їх оптимізацію.

Показано, що ефективним інструментом моделювання дискретних процесів є також мережі Петрі. Наведено їх основні особливості – можливість відображати паралелізм, асинхронність, ієрархічність моделюємих об'єктів більше простими засобами, ніж при використанні інших засобів моделювання. Це обумовило широке застосування мереж Петрі для дослідження складних ієрархічних дискретних систем, наприклад, гнучких виробничих систем (ГАВ). Представлено відповідні алгоритми, що реалізують аналітичне та імітаційне моделювання технологічних систем.

6.1 Основи структурної та параметричної оптимізації виробничих систем

При проектуванні технологічних процесів і роботи виробничого обладнання основний комплекс задач пов'язаний з вибором найкращого варіанта виробничої системи по сукупності техніко-економічних показників. Ці задачі мають кілька різновидів, яким відповідають три рівні оптимізації. Перший рівень оптимізації полягає в виборі найкращої технічної ідеї або принципу дії об'єкта, що проектується; другий – в пошуку найкращої структури або схеми в рамках обраного принципу дії; третій – у визначенні найкращих значень параметрів для обраної структури (схеми) [6.12].

Поділ на три рівні є умовним, і суворі границі між ними провести неможливо. Доцільність такого розподілу викликана необхідністю розмежування більш простих та більш складних і трудомістких задач, які належать до різних етапів проектування технології й у той же час істотно відрізняються методами розв'язання. Задачі першого рівня характерні для етапів зовнішнього проектування й розв'язуються з використанням підходів та методів евристичного програмування. Сучасні системи автоматизованого проектування технологічних процесів орієнтовані на етапи внутрішнього проектування. У цьому випадку характерними є задачі другого й третього рівня, які відповідно називаються задачами структурної та параметричної оптимізації.

При розв'язанні даних задач під терміном виробнича технологічна система будемо розуміти систему, метою якої є виготовлення певної кількості виробів за певний час, за допомогою чітко визначеної кількості обладнання. Власне кажучи, в даному випадку будемо описувати виробничу систему в термінах теорії масового обслуговування [6.13].

Тут система, що у зв'язку з можливими технічними, економічними й іншими застосуваннями, вважається структурною, на відміну від абстрактної системи, що є предметом дослідження загальної теорії систем. Елементом системи є довільний неподільний у даній задачі об'єкт. Неподільність елемента є умовною і викликана прагненням до спрощення задачі. При цьому цілком можливо, що при переході від однієї задачі до іншої буде потрібно розкладання одного елемента або навпаки, об'єднання декількох елементів в один. Об'єкт, який не розкладається в даній, але можливо буде розкладатися в іншій задачі, є блоком [6.14].

Система є визначеною множиною блоків (елементів), об'єднаних деякою множиною зв'язків для реалізації загальної мети. У системах обслуговування цією метою є виконання заданої множини робіт. Кожна робота складається з деякої кількості різноманітних операцій, виконуваних відповідними блоками. Система в цілому забезпечує послідовне проходження кожної роботи через визначені блоки, сукупність операцій в яких і забезпечує виконання даної роботи. Вважаємо, що операція є найменшою, неподільною частиною роботи. У зв'язку з цим, при дослідженні систем масового обслуговування кількісні характеристики (параметри) операцій повинні бути задані. Ці параметри можна задати матрицею $A = \|a_{i,j}\|$, де $a_{i,j}$ – кількісний ефект виконання i -ї операції в j -й роботі. Величини $a_{i,j}$ – можуть означати або витрати часу ресурсів, або дохід тощо. Конкретний зміст цих величин впливає на формулювання задач вивчення систем. Через параметри $a_{i,j}$ виражаються кількісні характеристики системи масового обслуговування в цілому.

Функціонування довільної системи є сукупністю правил, яка визначає, що повинна робити система для досягнення поставленої перед нею мети; ці правила не обов'язково використовують знання побудови системи. Взагалі, відповідно до рівня абстракції, прийнятого при вивченні системи, її функціонування може описуватися більш-менш докладними правилами. Так,

функціонування систем масового обслуговування зазвичай описується на рівні структури системи [6.14].

Під структурою довільної системи розуміємо сукупність множини блоків (елементів) і множини зв'язків між ними. Структура системи обслуговування зазвичай зображується орграфом, у якому вершини позначають блоки (елементи) системи, а дуги – напрямки руху робіт від блоку до блоку в процесі їх виконання [6.15, 6.16].

Для кількісної оцінки ступеня досягнення довільною системою поставленої перед нею мети вводять різні характеристики її функціонування. Кожна окрема характеристика оцінює якусь одну сторону функціонування системи, і лише всі разом вони дозволяють оцінити, наскільки система досягла поставлених цілей.

Вивчення будь-якої реальної системи проводиться на моделі, що представляє собою більш просту систему, ніж вихідна, зі збереженням її істотних рис. Моделі поділяються на фізичні й абстрактні. Останні в свою чергу поділяються на концептуальні і математичні. Концептуальні моделі характеризують лише причинно-наслідкові зв'язки, істотні для опису функціонування системи; при цьому залишаються осторонь кількісний і якісний аспекти зазначеного опису. Математична модель базується на концептуальній і характеризує функціонування системи з кількісної і якісної сторони.

Математична модель безпосередньо виробничої або технологічної системи описується таким чином. Є деяка множина виробів B , які необхідно виготовити, і деяка множина одиниць технологічного устаткування (верстатів) M , а також робітників для виготовлення цих виробів. Кожен виріб характеризується своїм технологічним маршрутом, тобто послідовністю проходження визначеної підмножини M , що приводить до одержання готового виробу. Система в даному випадку є сукупністю множин B і M , а її мета – виготовлення усіх виробів з множини B . При цьому верстати є блоками системи, а різноманітні вироби – роботами, що підлягають виконанню в даній системі. Технологічний маршрут виробу є упорядкованою множиною операцій, з якої складається процес виготовлення цього виробу. Кожна операція виконується окремим верстатом (блоком). Ефект виконання операції вимірюється необхідним для цього часом, витратами тощо. Всі верстати зі зв'язками між ними утворюють структуру системи. Спрямований зв'язок між двома верстатами показує, що після виконання операції в одній з них може виконуватися операція в іншій. Функціонування системи полягає в прокладці маршрутів у її структурі, відповідно до заданих технологічних маршрутів окремих виробів, і погодженому проходженні за визначеними маршрутами всіх виробів до їхнього повного виготовлення.

Задача структурного моделювання та оптимізації полягає в тому, щоб дослідити математичний апарат, який би адекватно описував структуру виробничої системи і давав би можливість алгоритмізувати процедури розрахунку найважливіших параметрів цієї системи. Зазвичай при детальному розгляді, ця проблема розпадається на декілька підзадач:

а) проаналізувати роботу виробничого обладнання за різними структурами й дослідити особливості моделювання кожної із них;

б) вибрати методику моделювання роботи обладнання виробничої системи, яка б якнайбільш повно описувала параметри системи та дозволяла б отримати її адекватну модель;

в) вибрати метод оптимізації роботи обладнання, який би задовольняв заданим обмеженням та мав би по можливості якнайкращу збіжність;

Класифікація систем має за мету по можливості уніфікувати кількісні характеристики систем, задачі їхнього вивчення і методи вирішення цих задач. В основу класифікації систем можуть бути покладені різні ознаки, тому в роботі розглянуто лише деякі із них, а саме – на структурах детермінованих систем масового обслуговування.

Виробничі системи в залежності від умов конкретного виробництва можуть мати послідовну, паралельну, паралельно-послідовну або послідовно-паралельну структуру, а у випадку передбаченого повернення готового виробу для виправлення браку – структуру системи зі зворотними зв'язками. Таким чином, виробничі системи можуть мати найрізноманітнішу структуру.

За режимом функціонування блоків усі системи поділяються на: системи з однопрограчним і багатопрограчним режимом; статичні і динамічні; без простоїв і з простоями блоків. До систем з однопрограчним (багатопрограчним) режимом функціонування відносяться ті, у яких одночасно виконується лише одна дія (кілька дій) (для систем обслуговування – одна робота (кілька робіт)). Статичними є системи, у яких за час виконання мети системи (у системах обслуговування – за час виконання заданої множини робіт) кожен блок виконує свою операцію не більш одного разу, динамічними – ті, у складі яких є блоки, що виконують свої операції за зазначений час не менш двох разів.

За режимом подачі робіт системи обслуговування поділяють на: системи з чеканням і без чекання; системи з вільним і примушеним за часом надходження робіт; конвеєрні і неконвеєрні; системи зі стаціонарним і нестаціонарним потоком робіт; системи з однією та з декількома роботами.

До систем з чеканням (без чекання) відносяться ті, у яких роботи після закінчення попередньої операції очікують звільнення блоку, що виконує наступну операцію (негайно передаються у вільний блок, що виконує наступну операцію). У системі з вільним за часом надходженням робіт усі роботи є в наявності вже в початковий момент $t=0$ запуску системи, тому моменти фактичної появи робіт не вказуються. Роботи надходять у систему для їх виконання відповідно до наявності в ній вільних блоків. У системах із примусовим за часом надходженням робіт останні з'являються в задані моменти часу, у загальному випадку пізніше, ніж момент $t=0$ запуску системи. Тут роботи подаються в систему лише після своєї появи і при наявності в ній вільних блоків. До конвеєрного типу відносяться системи, в яких порядок проходження робіт однаковий на всіх операціях, а до неконвеєрних – інші системи. В системах зі стаціонарним потоком робіт параметри потоку не змінюються з часом, а в системах з нестаціонарним потоком – змінюються.

За дисципліною обслуговування робіт, що очікують у блоках, можна виділити системи обслуговування типів: 1) „прийшла першою – обслугована першою”, 2) „прийшла першою – обслугована останньою”, 3) „прийшла першою – обслугована середньою по порядку”. 4) по порядку зростання деякого показника (зазвичай часу, необхідного для закінчення виконання даної роботи в системі), 5) обслуговування у випадковому порядку.

Схема роботи системи взагалі має дуже велике значення для її коректного моделювання, оскільки найчастіше методи математичного моделювання здатні адекватно описати тільки певну, одну структуру і не прийнятні для моделювання інших.

Структурна оптимізація технологічних систем, створюваних на базі виробничого устаткування, пов'язана з варіюванням їх компонентів: типами й варіантами виготовлення виробів, типами, послідовністю й варіантами концентрації технологічних операцій. Кожен варіант системи формується з елементів $w_g, g = \overline{1, G}$, показники яких f_{og} мають різні значення для реалізації $w_g = \overline{1, W_g}$. Сукупність елементів w_g і взаємозв'язок між ними характеризують структуру технологічної системи, а задача оптимізації полягає у виборі на множині комбінацій елементів w_g варіанта s^* , що є оптимальним в сенсі заданих техніко-економічних вимог $F_i^*, i = \overline{1, I}$ [6.12].

Можливості зміни перерахованих компонентів визначаються розмаїттям двох множин і зв'язків між ними:

– об'єктів виробництва (ОВ)

$$R \subset \times \{r_j : j \in J\},$$

де \subset – знак відносин;

\times – знак декартового добутку;

$r_j = \overline{1, R_j}$ – множини номерів об'єктів виробництва j -го найменування;

J – множина індексів найменувань об'єктів виробництва;

– технологічних операцій (ТО)

$$V \subset \times \{v_t : t \in T\},$$

де $v_t = \overline{1, V_t}$ – множина номерів технологічних операцій t -го найменування;

T – множина індексів найменувань технологічних операцій.

Таким чином, структура технологічної системи є сукупністю елементів $r_i \in R, v_t \in V$ і взаємозв'язків між ними. Технологічну систему (ТС) у цьому випадку зручно розглядати у вигляді відношення на непустій множині об'єктів виробництва та технологічних операцій

$$S \subset R \times V. \quad (6.1)$$

Елементами множини (6.1) є пари векторів r, v

$$s_l = (r, v), s_l \in S, l = \overline{1, L}.$$

Тут

$$r = (r_1, \dots, r_j, \dots, r_l), j = \overline{1, J}, r_j = \overline{1, R_j}; \\ v = (v_1, \dots, v_t, \dots, v_T), t = \overline{1, T}, v(t) = \overline{1, V_t}.$$

Позначимо спільну пару елементів $(r_j, v_t) = w_g, g = \overline{1, G}$.

Тоді

$$s_l = (w_1, \dots, w_g, \dots, w_G), l = \overline{1, L}, \quad (6.2)$$

де $w_g = \overline{1, W_g}, g = \overline{1, G}$ – елементи технологічної системи;

L – загальна кількість варіантів технологічної системи.

Методи розв'язання задач параметричної оптимізації роботи технологічних систем наведено в розділі 5.

Універсальні методи структурної оптимізації враховують тільки комбінаторний характер формування варіантів. Тому на їх основі можуть бути розв'язані тільки часткові задачі вибору оптимальної структури технологічних систем.

Одним із підходів до їх розв'язання є повний перебір [6.12]. Він припускає попередній синтез варіантів, які можна отримати шляхом формування всіх можливих комбінацій елементів $w_g = \overline{1, W_g}, g = \overline{1, G}$. Потім для кожної реалізації системи розраховуються значення показників $F_i, i = \overline{1, I}$, й здійснюється вибір оптимального варіанта. Позитивною стороною повного перебору є перегляд всіх дозволених комбінацій, що забезпечує високу надійність ухвалення оптимального рішення.

Зазначений підхід має недоліки, які накладають обмеження на його застосування. По-перше, відсутність математичних моделей, що враховують системні зв'язки об'єктів виробництва й технологічних операцій, вимагає формалізації дозволених комбінацій для кожної часткової задачі, що істотно збільшує витрати на попередню підготовку автоматизованого розв'язання. По-друге, повна кількість варіантів технологічної системи є досить значною, і машинний час, необхідний для їх генерування, стає неприйнятним. По-третє, у випадку множини техніко-економічних вимог пошук оптимальної системи призводить до додаткових витрат на повторний перебір й аналіз в області компромісів.

Підходом, спрямованим на обмеження кількості попередньо синтезованих варіантів, є скорочений перебір на основі випадкового пошуку. Однак через відсутність математичних моделей структурної оптимізації технологічної системи неможливо побудувати цілеспрямовані пошукові процедури, що прогнозують положення системи в просторі показників, що знижує надійність

неповного перебору. Крім того, не завжди можливо обґрунтувати умову зупинки некерованого процесу випадкового пошуку.

Формалізований підхід до врахування комбінаторного характеру структурної оптимізації досягається на основі методів дискретного програмування, тому що компоненти w_g варіювання задані на дискретній множині $1, \overline{W_g}$.

Технологічні системи, що використовуються при виготовленні деталей приладів та їх складанні, відносяться до дискретних систем, тому для моделювання та оптимізації їх роботи треба застосовувати відповідні методи. В наступних підрозділах наведено раціональні методи розв'язання таких задач.

6.2 Вибір методу моделювання виробничих систем

Виробнича система в загальному вигляді є системою з фіксованою кількістю обладнання (блоків системи), які оброблюють фіксовану кількість деталей (виконують визначені роботи).

Нажаль на сьогоднішній день не існує єдиної методики моделювання виробничих систем в цілому, тобто таких, які б адекватно і з достатньою точністю описували б параметри виробничих систем різних структур, тому для моделювання конкретного виду систем, або хоча б декількох близьких за структурою видів застосовують різноманітні математичні моделі. Вони так чи інакше здатні моделювати виробничу систему, але зазвичай кожен з них має свої межі застосування [6.17 – 6.29].

Моделі, що отримані методами лінійного цілочисельного програмування, можна використовувати тільки за умови накладення великої кількості обмежень на розв'язання задачі. Крім того, для застосування цих методів необхідно отримати відповідні залежності, за допомогою яких можна було б вирахувати параметри системи. Тому методи математичного програмування можуть застосовуватись як методи оптимізації при наявності добре формалізованих моделей системи.

Моделі систем масового обслуговування прийнятні лише для потоків робіт з випадковою їх кількістю та часом проходження, оскільки застосовують апарат теорії ймовірностей. Зазвичай можна розглядати вироджені випадки, коли випадковий потік замінюється потоком з наперед відомими параметрами. Тому будемо розглядати детерміновані моделі масового обслуговування, які дуже добре описують процеси, аналогічні тим, які необхідно змоделювати. Але такі моделі дуже відрізняються одна від одної в залежності від типу структури системи.

Моделі, що ґрунтуються на положеннях теорії графів, відрізняються від інших простотою та наочністю представлення як вхідних та вихідних даних, так і зображення структури самої системи.

Методи класичного моделювання та оптимізації добре вивчені, широко застосовуються в теоретичних задачах, але мають декілька суттєвих недоліків, зокрема з точки зору моделювання систем при їх застосуванні досить важко

розробити адекватну цільову функцію, що задовольняла б обмеженням, які існують при застосуванні даного методу, та давала б можливість добре трактувати результати подальших обчислень, зокрема результатів оптимізації моделі.

Статистичні методи застосовуються досить давно і дозволяють визначити фактори, що найбільш впливають на характеристики системи. Однак вони потребують великої кількості експериментальних даних і тому скоріше стануть у нагоді для вирішення завдань оптимізації емпіричних процесів тобто там, де не можна встановити однозначні залежності між параметрами системи.

Структурно-логічний метод моделювання прийнятний з точки зору наочності представлення системи та проведення розрахунків її параметрів, досить непогано алгоритмізується, має добру збіжність при застосуванні відповідних методів оптимізації, а також придатний для моделювання систем з різними типами структур, але він не є зручним з точки зору наочності представлення системи.

На основі виконаного аналізу методів моделювання виробничих систем з метою оптимізації їх роботи встановлено, що найбільший інтерес мають структурно-логічний метод дослідження технологічних систем та методи, що базуються на графічному представленні виробничих структур за допомогою мереж Петрі. Вказані методи розглядаються в даному розділі.

6.3 Дискретна оптимізація технологічних систем

Як відмічалось раніше, технологічні системи відносяться до детермінованих дискретних систем тому для розв'язання задачі оптимізації треба розробити відповідний алгоритм та скласти програму, що його реалізує.

Задача дискретної оптимізації при цілочисельних змінних формулюється так: визначити вектор оптимізуючих змінних $X=(x_1, \dots, x_j, \dots, x_n)$; $x_j \geq 0$, який доставляє мінімальне значення цільовій функції $\min f(X)$, $X \in G$, де G – кінцева множина припустимих значень вектора X .

Універсальним і розповсюдженим методом розв'язання цієї задачі, що має мінімальні вимоги до виду й властивостей цільової функції $f(X)$ і обмежень, які задають множину припустимих рішень G , є метод гілок і меж [630 – 636]. Алгоритм пошуку оптимального рішення X^* , для якого $f(X^*) = \min f(X)$, $X^* \in G$, будують по наступній стандартній схемі.

Спочатку послідовно розбивають (розгалужують) множину G на кінцеву кількість підмножин $G_1^k, \dots, G_{i^k}^k, \dots, G_{rk}^k$, $i = 1, 2, \dots, r$, де r – номер кроку. На кожному кроці перевіряють, чи містить дана підмножина G_i^k оптимальне рішення. Для цього обчислюють нижню границю (оцінку знизу) $V(G_i^k)$ множини значень $\{f(X), X \in G_i^k\}$. Цю границю визначають, розв'язуючи оціночну задачу

$$V(G_i^k) = \min f(X), X \in G_i^k, \quad (6.3)$$

де $G_i^k \subseteq G_v$.

Множину G_v формують, або відкидаючи вимогу цілочисельності x_j , або частину обмежень, що задають G .

Якщо в результаті рішення набору задач (6.3) будуть знайдені значення X такі, що $X \in G_i^k$ та $f(X) = V(G_i^k) \leq V(G_i^k) \quad \forall i=1,2,\dots,r_k; i \neq l$, то X є оптимальним рішенням. В протилежному випадку переходять до наступного кроку, вибираючи підмножину для чергової розбивки згідно з правилом

$$\min\{V(G_i^k), i=1,2,\dots,r_k\} \quad (6.4)$$

і повторюючи для нього процедуру розбивки та оцінювання. При необхідності подальшого розгалуження у виразі (6.4) розглядають підмножини, що не піддавалися розбивці, отримані як на даному, так і на всіх попередніх кроках.

Процедуру розгалуження й оцінювання, графічно зображувану в вигляді дерева розбивок, можна продовжувати до отримання окремих $X \in G$. Слід зазначити, що початковим кроком описаної схеми звичайно є розв'язання оціночної задачі (6.4) для вихідної множини G , тому що вже на цьому кроці можна одержати оптимальне рішення.

Ефективність (трудомісткість обчислень і необхідний обсяг пам'яті) алгоритмів методу гілок і меж значною мірою залежить від способів визначення границь і стратегії розгалуження, вибір яких істотно опирається на специфіку конкретної задачі.

Проілюструємо метод гілок і меж на прикладі наступної ситуації.

Відомий початковий стан оброблюваної поверхні (розмір, квалітет точності та шорсткість), дано також параметри кінцевого стану поверхні після обробки. Треба визначити послідовність операцій обробки цієї поверхні, якщо можливі варіанти маршрутів обробки надані в вигляді орієнтованого графа та відома вартість (або час) виконання кожної операції. Отриманий варіант маршруту обробки повинен забезпечити мінімальні витрати (або мінімальний час) обробки в межах встановленого ліміту операцій.

Математичною моделлю цієї ситуації служить задача знаходження

$$\min \sum_{j=1}^n a_j x_j, x_j \in X, \quad (6.5)$$

де X – множина можливих операцій обробки поверхні;

a_j – вартість (час) виконання j – тої операції.

В якості обмежень виступають наступні технологічні вимоги: кожна наступна операція підвищує якісні показники стану обробленої поверхні; можливість передування однієї операції іншій.

Для її розв'язання методом гілок і меж необхідно визначити спосіб одержання оцінки, процедуру розбивки припустимої множини рішень на підмножини й стратегію розгалуження, тобто вказати правило вибору підмножин для розбивки на черговому кроці.

Алгоритм розв'язання безперервної задачі полягає в наступному. Впорядкуємо операції в порядку можливого виконання та здійснимо розбиття

початкового графу на підграфи з врахуванням встановлених вимог, отримуючи таким чином підмножини рішень G_I на множині можливих G .

На кожному кроці для чергової розбивки вибираємо підмножину, якій відповідає мінімальне значення цільової функції. Пошук рішення закінчуємо, якщо на деякому кроці одержимо припустиме рішення, значення цільової функції на якому буде найменшим у порівнянні з оцінками для всіх підмножин – кандидатів на розбивку.

Даний метод буде застосовано при розв'язанні задач завантаження роботи обладнання технологічних виробничих систем структурно-логічним методом.

Метод гілок і меж також доцільно використовувати при оптимізації маршруту обробки складних корпусних деталей, при багатоваріантній обробці поверхонь деталі, визначенні оптимальної послідовності обробки отворів тощо, які можна представити в вигляді орієнтованого графу, тощо.

6.4 Структурно-логічний метод моделювання та оптимізації роботи виробничих систем

В методах дослідження виробничих систем можна виділити два основних напрямки: загальна (абстрактна) теорія систем [6.37 –6.43], що вивчає поводження системи поза зв'язком з її структурою, як співвідношення входів і виходів, та структурна теорія систем [6.44, 6.45], що вивчає функціонування системи в залежності від її структури. Можливість побудови детерміністської теорії систем обслуговування на базі математичного апарату нескінченнозначної логіки (НЛ) и логічних визначників (ЛВ) вперше була показана в [6.13], де розв'язувалась задача синтезу одного класу статичних систем. Згодом була показана можливість застосування зазначеного апарата до синтезу інших класів систем, а також до їх аналізу [6.13, 6.14].

Переваги апарата НЛ и ЛВ реалізуються в рамках структурно-логічного підходу до вивчення систем обслуговування, що припускає структурне представлення досліджуваної системи і вираження її характеристик через характеристики підсистем за допомогою НЛ та ЛВ.

Структурно-логічний метод не має більшості вад інших методів моделювання та оптимізації роботи виробничих систем, тобто він прийнятний з точки зору наочності представлення системи та проведення розрахунків її параметрів, досить просто піддається формалізації, має добру збіжність при застосуванні відповідних методів оптимізації, а також, що найголовніше, придатний для моделювання систем з різними типами структур, а саме: послідовної, паралельної, паралельно-послідовної та послідовно-паралельної. Даний підхід дає можливість на основі незначної кількості подібних алгоритмів проводити розрахунок, аналіз та синтез оптимальної структури виробничої системи.

6.4.1 Побудова математичних моделей виробничих систем

Задачі вивчення систем дуже різноманітні й в значній мірі визначаються

класом досліджуваної системи. Однак існують і універсальні типи задач, що мають найважливіше значення для багатьох класів систем: представлення, розрахунок, аналіз і синтез.

Представлення системи – це представлення всієї заданої інформації про систему в компактній формі, що полегшує опис системи, а також формулювання та рішення задач її розрахунку, аналізу і синтезу.

Розрахунок системи полягає у визначенні чисельних значень або виразів різних характеристик функціонування системи за заданою структурою системи, режиму її функціонування (для системи обслуговування – ще і порядку виконання робіт, що надходять до неї) та за чисельним значенням параметрів її блоків. Задача розрахунку системи має важливе значення для всіх класів систем. Вона розкриває можливості існуючих природних (біологічних, соціальних) і лежить в основі проектування штучних (технічних, організаційно-економічних) систем.

Аналіз системи складається у визначенні виду залежності різних характеристик функціонування системи від її структури, режиму її функціонування (для системи обслуговування – ще і порядку виконання в ній робіт), значень параметрів її блоків. Аналіз дозволяє установити ступінь впливу зазначених трьох факторів на характеристики системи. Завдяки цьому виявляється можливим виконати розрахунки точності (стійкості) функціонування системи при різних значеннях її параметрів і структури та розрахунки при проектуванні систем з метою досягти потрібних значень характеристик систем шляхом деякої зміни їх параметрів і структури.

Синтез довільної системи складається в визначенні її структури і режиму функціонування за заданою метою системи, за значеннями параметрів її блоків і необхідними значеннями характеристик функціонування системи [6.14]. Синтез системи обслуговування полягає в знаходженні її структури та порядку виконання в ній робіт із заданої множини робіт, що підлягають виконанню, значеннях параметрів блоків, що утворюють структуру цієї системи, та необхідних значеннях різних характеристик функціонування системи.

Задача представлення системи важлива тільки для складних систем, у той час як задачі розрахунку, аналізу і синтезу істотні для будь-яких систем – як простих, так і складних. В нашому випадку розглядаються системи обслуговування, для яких розв'язуються задачі представлення, розрахунку, аналізу, а також задачі синтезу у вигляді задачі знаходження оптимального порядку виконання заданої множини робіт у системі, що забезпечує оптимальні значення тих чи інших характеристик системи. При цьому структура системи і параметри її блоків вважаються заданими. В роботі розглядаються детерміновані задачі представлення, розрахунку, аналізу і синтезу систем обслуговування з типовою структурою (послідовних, паралельних, паралельно-послідовних, послідовно-паралельних), з різними режимами функціонування блоків і подачі робіт, з можливістю введення обмежень на функціонування блоків.

Наведемо математичні моделі, для кожного виду системи, згідно задач, що вирішуються. Задачами розрахунку й аналізу системи обслуговування є

відповідно:

а) обчислення різних її характеристик (продуктивності, завантаження тощо) згідно з заданими аналогічними характеристиками її блоків, схемі їх з'єднання, кількості робіт, що надходять у систему, і режиму функціонування системи;

б) визначення характеру й ступеня впливу всіх заданих факторів на характеристики системи.

При цьому рішення першої задачі повинне передувати рішенням другої. Складність рішення обох задач істотно залежить від схеми з'єднання блоків у систему (послідовне, паралельне тощо), режиму функціонування системи (однопрограми́й чи багатопрограми́й, з чеканням роботами свого виконання чи без чекання тощо), кількості робіт, що надходять у систему. Система з однією роботою може бути лише без чекання і з однопрограми́м режимом виконання. Аналіз таких систем не представляє проблеми і тут не розглядається. З інших систем найбільш зручними для розрахунку й аналізу є послідовні системи. Розглянемо систему у виді m послідовно з'єднаних блоків, призначену для послідовного виконання m різних операцій [6.14]. У систему надходить n різних робіт, кожна з яких розпадається на m вищевказаних операцій. Часи a_{ij} виконання операцій i ($i = \overline{1, m}$) для робіт j ($j = \overline{1, n}$) задані матрицею $A = \|a_{ij}\|$. Виконання робіт у системі може вестися в двох режимах: однопрограми́му і багатопрограми́му. У першому режимі спочатку послідовно виконуються всі операції першої роботи, потім у тому ж порядку всі операції другої роботи і т.д. У другому режимі роботи запускаються в систему і проходять її послідовні блоки $1, 2, \dots, m$ в одному й тому самому порядку $P_n = (j_1, j_2, \dots, j_n)$; тут j_k – номер роботи, що слідує k -ю по порядку. При цьому моменти надходження робіт у систему не вказуються (вільне за часом надходження робіт), блок 1 завантажується і починає виконувати свою операцію в черговій роботі j_k відразу після звільнення від попередньої роботи j_{k-1} (тобто в блоці немає простоїв); завантаження першої роботи j_1 відбувається в початковий момент $t = 0$. Однак вже блок 2 починає виконувати свою другу операцію в черговій роботі j_k не відразу після звільнення від попередньої роботи, а лише після закінчення в блоці 1 першої операції роботи j_k . Аналогічні співвідношення за часом між функціонуванням блоків 2 і 3, 3 і 4, ..., $m-1$, m . Таким чином, у блоках 2, 3, ..., m можливі простой. Але можливо, що робота, яка надходить у блок, застає його зайнятим попередньою роботою. При цьому блок працює без простоїв, однак роботи, що надходять до нього, очікують, утворюючи чергу, що обслуговується блоком за правилом: першим прийшов – першим обслугований. Так що система з багатопрограми́м режимом функціонування є системою з очікуванням.

Для **послідовної системи** сумарний час $T_o(m, n)$ проходження всіх n робіт через усі m блоків системи з однопрограми́м режимом виконання робіт дорівнює підсумовуючому логічному визначнику (ЛВ) від матриці $A = \|a_{ij}\|$ часів операцій, а для випадку багатопрограми́ного режиму $T_m(m, n)$ –

диз'юнктивному ЛВ від матриці $A = \|a_{ij}\|$

В випадку **паралельної системи** вона представляється у вигляді m паралельно з'єднаних блоків 1, 2, ..., m , що призначені для паралельного виконання однотипних робіт [6.14]. Блоки є функціонально еквівалентними, тобто можуть виконувати кожну з робіт. Однак швидкодія блоків у загальному випадку різна – час виконання в блоці роботи складає a_{ij} . Часи a_{ij} утворюють матрицю часів робіт $A = \|a_{ij}\|$ розміру $m \times n$. Система працює в багатопрограмному динамічному режимі таким чином. Роботи 1, 2, ..., n подаються в систему в заданому порядку $P_n = (j_1 j_2, \dots, j_n)$, де $j_k \in \{1, \dots, m\}$, але без вказівки моментів надходження, тобто вільно за часом. При цьому в початковий момент $t = 0$ одночасно робота j_1 завантажується в блок 1 (який негайно приступає до виконання своєї операції), аналогічно робота j_2 – у блок 2 і так далі – робота j_m – у блок m . Після цього всі блоки системи виявляються завантаженими виконанням перших m робіт j_1, \dots, j_m . Тому черговій роботі j_{m+1} прийдеться очікувати, поки буде виконана перша $j^{(1)}$ із завантажених робіт j_1, \dots, j_m , щоб потім зайняти її місце в блоці, що звільнився. Наступній за чергою роботі j_{m+2} прийдеться очікувати свого завантаження в систему до моменту, коли буде виконана перша з нової множини робіт $\{j_1, \dots, j_m, j_{m+1}\}$, що знаходяться в цей момент у системі і т.д. Звідси випливає, що розглянута система працює без простоїв (тобто з завантаженням, що дорівнює 1) в режимі очікування робіт початку свого виконання. Одночасно з задачами розрахунку й аналізу вирішується задача представлення системи, використовуючи для цього апарат порядкових логічних визначників (ЛВ).

Матриця $T(m, n) = \bigvee_{k=1}^n t_k$ є основним співвідношенням для розрахунку швидкодії системи. Вона зводить визначення характеристики швидкодії системи $T(m, n)$ до обчислення вектора моментів закінчення виконання робіт у системі.

В випадку використання **паралельно-послідовної** та **послідовно-паралельної** систем вони представляються в вигляді M послідовно з'єднаних ступенів (груп, блоків), що призначені для виконання робіт, які складаються з M різних операцій [6.14]. Нехай i -й ступінь ($i = \overline{1, M}$) слугує для виконання i -ї операції і є підсистемою у вигляді m_i паралельно з'єднаних блоків 1, 2, ..., m_i . Всі блоки одного ступеня функціонально еквівалентні, тобто налаштовані на виконання однієї операції, причому i -й ступінь може виконувати одночасно m_i таких однотипних операцій (по кількості блоків у ній). Вважаємо, що всі блоки одного ступеня мають однакову швидкодію (тобто ступені однорідні по блоках). У систему надходить сукупність n різних робіт, кожна з яких складається з M вищевказаних операцій. Часи a_{ij} виконання i -ї операції ($i = \overline{1, M}$) для роботи j ($j = \overline{1, n}$) задані й утворюють матрицю $A = \|a_{ij}\|$. Виконання робіт у системі можливо в двох режимах: однопрограмному та багатопрограмному.

В першому режимі спочатку послідовно виконуються всі операції роботи

1, потім у тому ж порядку всі операції роботи 2 і т.д. У другому режимі система функціонує таким чином. Вказується порядок $P_{1n} = (j_{11}, j_{12}, \dots, j_{1n})$ запуску робіт на першу операцію (перший ступінь системи), де j_{1k} – номер роботи, що запускається k -ю по порядку. При цьому задаються моменти надходження окремих робіт, тобто ми маємо систему з вільним за часом надходженням робіт. Виконання першої операції в черговій роботі j_{1k} розпочинається, як тільки серед блоків першого ступеня, зайнятих виконанням цієї операції в попередніх роботах $j_{11}, \dots, j_{1,k-1}$ звільниться який-небудь блок. Виконання будь-якої i -ї ($i = \overline{1, M}$) операції в черговій роботі j_{1k} розпочинається, як тільки закінчиться виконання в цій роботі попередньої $(i-1)$ -ї операції і серед блоків i -го ступеня, що зайняті виконанням i -ї операції в роботах j_k які надходять, звільниться який-небудь блок.

Математичний апарат нескінченнозначної логіки (НЛ) може слугувати адекватним засобом опису детермінованих систем обслуговування. Ця адекватність виявляється в тому, що для довільної, системи будь-яку характеристику функціонування звичайно можна виразити через параметри системи за допомогою логічних операцій НЛ (доповнених іноді звичайним алгебраїчним додаванням). При цьому формально розходження між характеристиками зводиться до того, що одні з них одержують прості вирази (що містять мало зазначених операцій), а інші – складні (оскільки містять багато операцій). Використовуючи розроблені в НЛ правила еквівалентних логічних перетворень, отримане вираження характеристики функціонування завжди можна привести до того чи іншого зручного виду. Цей вид залежить від розв'язуваної системної задачі. Так, для розв'язання задачі розрахунку найбільш зручним є мінімальне вираження характеристики, що містить найменшу можливу кількість логічних і інших операцій; для розв'язання задачі аналізу – вираження характеристики з виділеним параметром, вплив якого на систему аналізується; для розв'язання задачі синтезу – вираження характеристики у формі, чутливої до зміни порядку виконання робіт у системі. Ця можливість гнучкого представлення різних характеристик функціонування систем у термінах операцій НЛ відкриває принципову можливість однакового, ґрунтованого на правилах еквівалентних логічних перетворень НЛ, розв'язання всього комплексу задач дослідження систем – розрахунку, аналізу, синтезу [6.14].

Зазначена можливість однакового рішення задач розрахунку, аналізу і синтезу систем обслуговування за допомогою апарата НЛ безпосередньо реалізується лише для досить простих систем, де кількість блоків мала, а зв'язки між ними не розвинені. У складних системах внаслідок наявності великої кількості блоків з розвинутими зв'язками між ними на шляху реалізації зазначеної можливості виникають додаткові труднощі, що пов'язані з необхідністю рішення задачі представлення системи.

В подоланні цих труднощів основну роль відіграє математичний апарат ЛВ. Оскільки ЛВ є параметром укрупненого опису досліджуваної системи, то вони дозволяють представити всю задану інформацію про систему в компактній, доступній для огляду формі, що робить систему "простою" і

відкриває шлях до її дослідження зазначеними вище методами дослідження простих систем, основаними на апараті НЛ. Крім цього, апарат ЛВ дозволяє внести в процес вивчення складних систем обслуговування і ряд інших істотних спрощень.

6.4.2 Система математичного моделювання та оптимізації завантаження технологічного обладнання

З метою моделювання та оптимізації завантаження виробничих технологічних систем розроблено автоматизовану систему на основі структурно-логічних підходу дослідження складних систем, структурну схему якої наведено на рис 6.1 [6.8].

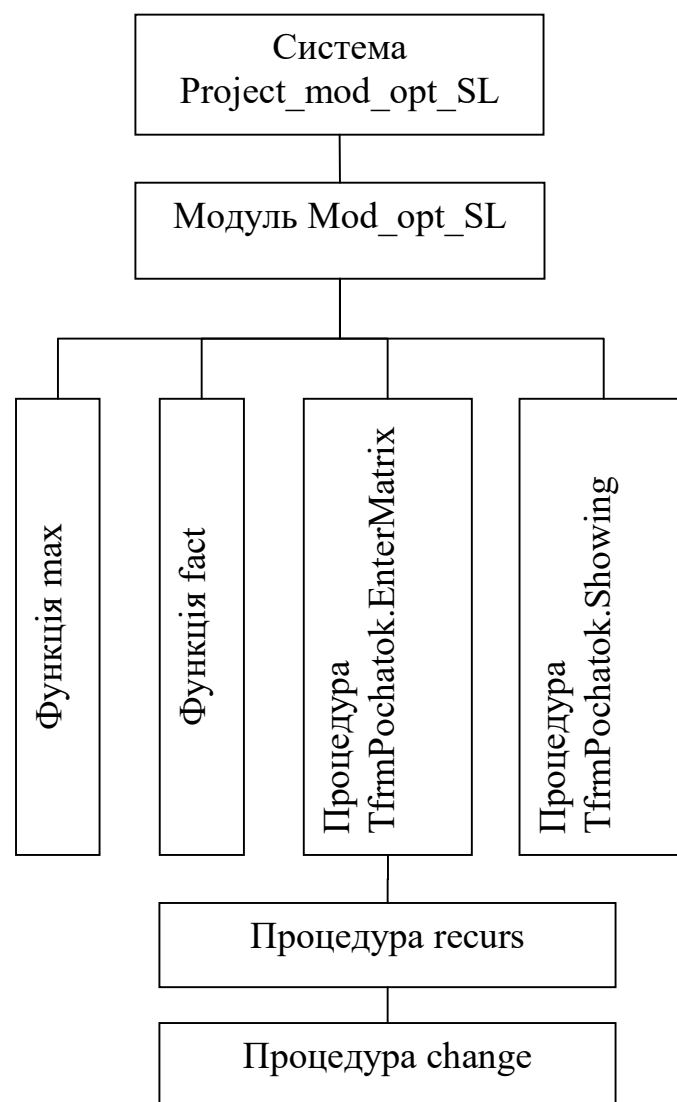


Рис. 6.1. Структурна схема системи.

При розробці програмного забезпечення універсальної системи моделювання та оптимізації завантаження технологічного обладнання виробничих систем використано об'єктно-орієнтовану мову програмування

DELPHI 5. Програма складається з одного модуля Mod_opt_SL та файлу проекту Mod_opt_SL.exe. Даний модуль відповідає за всі дії програми, тобто введення початкових даних для моделювання та оптимізації завантаження верстатів виробничої системи, безпосереднє моделювання та оптимізацію, а також виведення одержаних результатів. Він включає 4 процедури (TfrmPochatok.EnterMatrix, TfrmPochatok.Showing, recurs та change) та 2 функції (max та fact).

Для роботи з системою створено зручний інтерфейс. Після завантаження файлу Mod_opt_SL.exe з'явиться вікно вибору виду виробничої системи (рис. 6.2). В цьому вікні необхідно вибрати необхідну структуру системи зі списку, що розкривається. В цьому списку представлені наступні системи: послідовна, паралельна, паралельно-послідовна та послідовно-паралельна. Після вибору системи необхідно натиснути кнопку „Далі”. Після цього в даному вікні, відповідно до вибраної системи, з'являються написи та поля для введення, а також список, що розкривається для вибору методу введення вихідних даних (рис. 6.3).

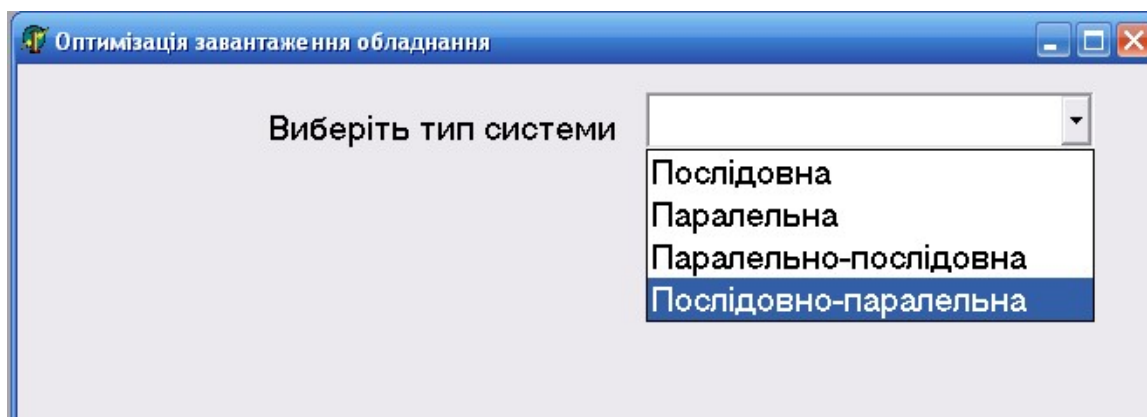


Рис. 6.2. Вікно вибору виду системи.

В даному вікні необхідно ввести кількість верстатів, що використовуються для обробки заданої кількості різних деталей, кількість різних деталей, що підлягають обробці, а також вибрати зі списку, що розкривається метод введення матриці часів операцій обробки даних деталей. Дану матрицю можна вводити з файлу C:\Dani.txt, а також з клавіатури. Після цього для продовження роботи з системою треба натиснути кнопку „Далі”. Після цього, в разі введення даних з клавіатури, з'явиться віконце для введення часу виконання операцій (рис. 6.4).

В даному вікні необхідно ввести час обробки деталі на даному верстаті та натискати кнопку „ОК”. Після введення усіх часів операцій, у вікні з'являється поле виведення з результатами моделювання та оптимізації завантаження верстатів виробничої системи (рис. 6.5).

Рис. 6.3. Вікно введення початкових даних.

Рис. 6.4. Вікно введення матриці часу виконання операцій.

В даному вікні надано результати моделювання та оптимізації, а саме:

- 1) час обробки деталей при довільній послідовності їх проходження в виробничій системі;
- 2) оптимальна послідовність проходження деталей в виробничій системі, при якій час їх обробки мінімальний, тобто мінімізується час простою верстатів;
- 3) час обробки деталей при оптимальній послідовності їх проходження в виробничій системі.

Рис. 6.5. Вікно з результатами моделювання та оптимізації.

Після отримання результатів, для повторного використання системи необхідно закрити дане вікно, шляхом натиснення на відповідну кнопку в верхньому правому куті даного вікна.

В якості прикладу використання розробленої системи наведено моделювання та оптимізацію завантаження технологічного обладнання при виготовленні деталі типу „Корпус”. Технологічний маршрут виготовлення цієї деталі та час виконання технологічних операцій наведено в додатку Д. Цей технологічний маршрут включає 17 токарних операцій, 6 універсально фрезерних, 2 фрезерних операцій з ЧПК та 10 свердлильних операцій. Кількість деталей в партії складає 150 шт.

Для визначення ефекту оптимізації завантаження обладнання спочатку виконано розрахунок часу обробки партії деталей при реальній структурі виробничої системи, тобто на послідовній, а потім – на основі використання паралельно-послідовної структури виробничої системи.

В результаті практичного випробування створеної системи математичного моделювання та оптимізації завантаження технологічного обладнання виробничих систем були отримані такі результати:

- 1) виробничий цикл обробки партії деталей при реальній структурі виробничої системи 1273,00 хв.;
- 2) виробничий цикл обробки партії деталей при використанні паралельно-послідовної структури виробничої системи складає 1006,29 хв.;
- 3) економія виробничого циклу обробки партії деталей типу „Корпус” складає 21%. Тому використання розробленої системи моделювання та

оптимізації дозволяє значно скоротити виробничі витрати на обробку деталей за рахунок зменшення простою технологічного обладнання.

Таким чином, використання структурно-логічного підходу до моделювання та оптимізації виробничих систем має такі переваги:

а) уніфікація за допомогою логічних визначників обчислювальних процедур при дослідженні систем призводить до того, що всі задачі розрахунку й аналізу, а також синтезу складних систем зводяться до обчислення тих або інших ЛВ, тобто є однотипними з обчислювально-математичної точки зору;

б) отримання аналітичних умов оптимальності порядку робіт у системі та на їх основі – процедури синтезу деяких класів складних систем мають знижену складність обчислень;

в) модифікація процедури гілок і меж, яка застосовується в задачах синтезу складних систем з метою підвищення її точності і швидкодії, дозволяє інтенсифікувати відсікання безперспективних варіантів шляхом додаткового використання інформації, яка міститься в умовах оптимальності, та отриманням за допомогою ЛВ більш точних оцінок, що до того ж має знижену обчислювальну складність.

Зазначені вище переваги використання НЛ и ЛВ реалізовані в рамках структурно-логічного підходу до вивчення виробничих систем, що припускає структурне представлення досліджуваної системи та вираження її характеристик через характеристики підсистем за допомогою НЛ та ЛВ.

6.5 Моделювання роботи виробничих систем за допомогою мереж Петрі

Одним з перспективних підходів до оптимального використання виробничих систем є розробка математичних моделей на основі ЕОМ з використанням теорії мереж Петрі. Мережі Петрі дозволяють відображати паралелізм, асинхронність, ієрархічність об'єктів, що моделюються, більш простими засобами ніж при використанні засобів моделювання, таких як методи лінійного програмування, методи класичної оптимізації, застосування традиційних систем масового обслуговування тощо.

При використанні мереж Петрі для моделювання виробничих систем в приладобудівному виробництві можна розв'язати задачу підвищення ефективності виробничих систем шляхом вдосконалення методів керування роботою технологічного та транспортно-складського обладнання.

Структура промислової системи на будь якому рівні визначається сукупністю елементів, необхідних для реалізації всіх дій, які потрібні для виготовлення виробу [6.28]. Таким чином, будь яку промислову систему незалежно від ієрархічного рівня можна описати виразом:

$$Z = \sum_{j=1}^n R_j + \sum_{j=1}^m S_j + \sum_{j=1}^p T_j + \sum_{j=1}^q C_j, \quad (6.6)$$

де R_j – система, що реалізує дії отримання (модуль отримання);

S_j – система, що реалізує дії зберігання (модуль зберігання);
 T_j – система, що реалізує дії переміщення (модуль переміщення);
 C_j – система, що реалізує дії перетворення (модуль перетворення);
 n – кількість елементів системи, що реалізують модуль отримання;
 m – кількість елементів системи, що реалізують модуль зберігання;
 p – кількість елементів системи, що реалізують модуль переміщення;
 q – кількість елементів системи, що реалізують модуль перетворення.

Втім промислова система може виконувати не всі типи дій. Відповідно в ній будуть відсутні елементи, необхідні для здійснення таких дій. Крім того, у промислових системах можуть бути елементи, що реалізують кілька типів дій одночасно (наприклад, роторні машини, що виконують одночасне збереження, переміщення і перетворення).

На рівні виробничого комплексу дії отримання, збереження, переміщення і перетворення здійснюються приймальним, складським, транспортним і перетворюючим комплексами відповідно. Кожний з цих комплексів по прийнятій ієрархії, в свою чергу, є технологічним комплексом, і на кожному з них реалізується відповідний технологічний процес. Таким чином, можна виділити: приймальний технологічний комплекс, складський технологічний комплекс, транспортний технологічний комплекс та технологічний комплекс, що перетворює. В загальному випадку кількість необхідних технологічних комплексів різного виду може бути будь-яким і залежить від особливостей реалізованого виробничого процесу. Приймальні технологічні комплекси на підприємстві можуть мати служби матеріально-технічного постачання і забезпечення. Складські технологічні комплекси на підприємстві – це система складів для збереження матеріалів, заготовок, напівфабрикатів, інструментів, устаткування тощо. Транспортний технологічний комплекс на підприємстві представлений транспортним цехом або іншою службою, що забезпечує транспортування по території підприємства матеріалів, заготовок, інструментів і інших предметів і засобів праці. Перетворюючі технологічні комплекси на підприємстві включають цехи основного виробництва (заготівельні, механообробні, термічні, складальні). Таким чином, виробничий комплекс у загальному виді можна описати виразом (6.6).

На рівні виробничого технологічного комплексу дії з отримання виконує цехова система постачання, дії зі збереження – цехова складська система (наприклад, цеховий склад заготовок, склад інструментів, склад пристосувань та ін.), дії з переміщення – транспортна система (наприклад, система цехового транспортування заготовок та інструментів на робочі місця), дії з перетворення – перетворююча система (наприклад, робоче місце чи автоматична лінія). Кожна з цих систем відповідно до прийнятої ієрархії, у свою чергу, є операційною системою. Тобто можна виділити приймальну операційну систему, складську операційну систему, транспортну операційну систему та перетворюючу операційну систему і на кожній з них реалізується відповідна операція. Кількість необхідних операційних систем різного виду може бути будь-яка і залежить від особливостей реалізованого технологічного процесу.

Аналогічно можна структурувати приймальний, складський і

транспортний технологічні комплекси. У них також виконуються дії з отримання, збереження, переміщення і перетворення, а отже, є і відповідні елементи. Наприклад, у складському технологічному комплексі, призначеному для збереження інструментів, дії з отримання здійснює відповідна служба, дії зі збереження виконує власне склад, дії з переміщення – складські транспортні системи, дії з перетворення – інструментальний цех.

Таким чином, приймальний, складський, транспортний і технологічний комплекси можна описати наступними виразами:

$$\begin{aligned} R_i &= \sum_{j=0}^n R_j^{R_j} + \sum_{j=0}^m S_j^{R_j} + \sum_{j=0}^p T_j^{R_j} \sum_{j=0}^q C_j^{R_j}; \\ S_i &= \sum_{j=0}^n R_j^{S_j} + \sum_{j=0}^m S_j^{S_j} + \sum_{j=0}^p T_j^{S_j} \sum_{j=0}^q C_j^{S_j}; \\ T_i &= \sum_{j=0}^n R_j^{T_j} + \sum_{j=0}^m S_j^{T_j} + \sum_{j=0}^p T_j^{T_j} \sum_{j=0}^q C_j^{T_j}; \\ C_i &= \sum_{j=0}^n R_j^{C_j} + \sum_{j=0}^m S_j^{C_j} + \sum_{j=0}^p T_j^{C_j} \sum_{j=0}^q C_j^{C_j}; \end{aligned} \quad (6.7)$$

Для реалізації виробничого (технологічного) процесу виготовлення виробів може бути використано кілька різних промислових систем.

Проблема оцінки ефективності на практиці полягає в тому, що для великої кількості ситуацій характерна багатокритеріальність. Однак для багатьох з них задачу оптимізації можна звести до однокритеріальної, що значно спрощує методику отримання рішення.

Моделювання систем за допомогою мереж Петрі, робить можливим отримати важливу інформацію про структуру та динамічну поведінку систем. Ця інформація корисна для оцінки систем та розгляду пропозицій з їх удосконалення та зміни.

Застосування мереж Петрі для моделювання виробничих систем, що використовуються в приладобудівному виробництві, дозволяє по наданим технічним характеристикам складових елементів системи визначити показники, що характеризують систему в цілому, а саме загальну продуктивність виробничої системи та ступінь завантаження її обладнання з наступною оптимізацією його роботи.

6.5.1 Мережі Петрі як засіб моделювання роботи виробничих систем

6.5.1.1 Мережі Петрі та особливості їх використання для опису складних систем

Зазвичай мережі Петрі застосовують для моделювання складних систем [6.15, 6.16, 6.46 – 6.62]. В багатьох областях досліджень процеси та явища

вивчається не безпосередньо, а через їх моделі. Модель, як правило, представляє в математичних термінах те, що вважається найбільш характерним в об'єкті, який вивчається, або в системі. Очікується, що, маніпулюючи представленням, можна отримати нові знання про явище, що моделюється, уникаючи небезпеки, значної вартості або незручностей маніпулювання самим реальним явищем.

Зазвичай моделі процесів і явищ мають математичну основу. Характеристики багатьох фізичних явищ можна описати числами, а зв'язок їх характеристик – рівняннями або нерівностями. Так, в природничих науках та техніці рівняннями описують такі характеристики, як маса, положення в просторі, момент, прискорення, сили тощо. Втім, для успішного використання підходу моделювання необхідні знання як явищ, що моделюються, так і властивостей методів моделювання. Тому, математика, як наука, розвивалась частково завдяки використанню її при моделюванні явищ, що вивчаються іншими науками.

Завдяки створенню швидкодіючих ЕОМ використання та доцільність моделювання значно збільшилась. Представлення системи математичною моделлю, перетворення цієї моделі в команди для ЕОМ та виконання програм на ЕОМ зробили можливим моделювання великих і більш складних систем. Це призвело до значного розширення областей використання методів моделювання на ЕОМ.

Мережа Петрі складається із чотирьох елементів: множини позицій P , множини переходів T , вхідної функції I та вихідної функції O [6.15, 6.16, 6.48]. Вхідна та вихідна функції пов'язані з переходами та позиціями. Вхідна функція I відображає перехід t_j в множині позицій $I(t_j)$, які мають назву вхідні позиції переходу. Вихідна функція t_j в множині позицій $O(t_j)$ має назву вихідної позиції переходу.

Таким чином мережа Петрі C визначається четвіркою $C=(P, T, I, O)$. Тут $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ є кінцевою множиною позицій, $n \geq 0$, $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – кінцевою множиною переходів, $m \geq 0$. Множини позицій та переходів не перетинаються.

Комплектом є узагальнення множини, в яку включені багатократні елементи, що повторюються. Використання комплектів, а не множин для входів та виходів переходів дозволяє позиції бути кратним входом або кратним виходом переходу. Якщо вхідна і вихідна функції є множинами то кратність кожної позиції дорівнює 0 або 1. Вхідні та вихідні функції використовуються для відображення позицій у комплекті переходів, а також навпаки.

6.5.1.2 Задачі моделювання виробничих систем за допомогою мереж Петрі

При використанні мереж Петрі для моделювання виробничих систем можна розв'язати дві задачі (пряму та обернену). Пряма задача полягає в наступному – за відомими технічними характеристиками елементів підсистеми визначити показники, що характеризують систему в цілому, а саме: загальну продуктивність, ступінь завантаження обладнання тощо. Друга (обернена)

задача дозволяє за заданими критеріями та вимогами до виробничої системи визначити такі її характеристики як склад основного обладнання, тип та структуру транспортної системи, алгоритми керування тощо.

При розв'язанні цих задач доцільно об'єднати в єдиній процедурі аналітичні та імітаційні методи моделювання. Прикладом такого об'єднання є моделюючий програмний комплекс, який може експлуатуватися в складі програмного забезпечення САПР.

Моделюючий комплекс складається з двох послідовно з'єднаних блоків – аналітичного та імітаційного. Він може використовуватись для розв'язання задач аналізу і синтезу при проектуванні, плануванні та перебудові виробництва.

Процес **аналітичного моделювання** завантаження виробничих систем поділяється на три етапи [6.15].

На першому етапі визначається загальна продуктивність основного обладнання. Якщо розраховане значення продуктивності не забезпечує виконання планового завдання, то подальший аналіз не має сенсу. Інформація про невідповідність розрахованої продуктивності передається користувачу, який повинен прийняти рішення про внесення змін. Після цього розрахунок повторюється. Етап закінчується, коли користувач знаходить прийнятне рішення.

На другому етапі підраховується інтенсивність потоків виробів між елементами системи. Ці розрахунки є вихідними для визначення та аналізу характеристик інших підсистем.

На третьому етапі визначається завантаження транспортної системи. Якщо в результаті розрахунків виявиться, що коефіцієнт завантаження транспортної системи перевищує одиницю, то користувачеві передається відповідне повідомлення і він повинен прийняти рішення про внесення змін. Якщо при внесенні змін так і не вдалося зменшити коефіцієнт завантаження до значення, що є меншим одиниці, то це означає, що планове завдання нездійсненне. Безперечно, в цьому випадку слід змінити планове завдання та повернутися до першого етапу.

Блок **імітаційного моделювання** складається з трьох частин: засобів генерації моделей, імітатора та інтерпретатора [6.15]. Засоби генерації дозволяють користувачу побудувати імітаційну модель об'єкту (наприклад, виробничої ділянки). Імітатор побудований на основі модифікованого апарату мереж Петрі. Інтерпретатор – це комплекс програм для аналізу та інтерпретації результатів експерименту.

Вхідною інформацією для моделювання є планове завдання з об'єму та номенклатури, технологія виготовлення виробу, схема розміщення та техніко-економічні характеристики обладнання.

Наведемо елементи формального опису вхідних даних, а також деякі принципи побудови та функціонування типової ділянки.

Планове завдання та технологія характеризується наступними параметрами: K – кількість типів виробів; I – кількість різних операцій, які виконуються над виробами всіх типів; $A = \|a_{ki}\|$ – матриця розмірності $K \times I$, де

$a_{ki} = 1$, якщо при обробці виробу k -го типу виконується i -та операція; $a_{ki} = 0$, – інакше

$$Z_k = \{i : a_{ki} = 1\}. \quad (6.8)$$

Позначимо Z_k – множина операцій, які виконуються над виробом k -го типу, а T_k – технологія виробництва виробу k -го типу, яка є множиною дозволених послідовностей виконання операцій над виробом k -го типу. Якщо $Z_k = \{i_1, i_2, \dots, i_t\}$, то $T_k = \{(i_{\pi(1)}, \dots, i_{\pi(t)}) : \pi \in \prod k\}$, де $\prod k$ – деякий клас перестановок порядку t .

Якщо порядок виконання операцій над виробом k -го типу визначений суворо, то T_k – фіксована перестановка i_{j_1}, \dots, i_{j_t} , де $\{j_1, \dots, j_t\} = \{1, \dots, t\}$.

Виготовлення виробів здійснюється комплексно, тобто співвідношення кількості виробів кожного типу, випущених за запланований період T , повинно задовольняти певній пропорції. Отже, планове завдання можна представити у вигляді вектора $X = (x_1, \dots, x_K)$, $x_k \geq 0$, $k = \overline{1, K}$, де x_k – доля виробу k -го типу в загальному об'ємі випуску X .

$$\sum_{k=1}^K x_k = 1 \quad (6.9)$$

Основне обладнання – це верстати, оброблюючі або складальні центри, пристрої перебазування, пристосування та супутники або полети касетування та контролю деталей, а також механізми, за допомогою яких виконуються основні операції, передбачені технологією виготовлення виробів. В подальшому елементи, що утворюють основне обладнання, будемо називати робочими позиціями та позначимо PP_j ($j = \overline{1, J}$), де J – кількість робочих позицій на ділянці. Кожну робочу позицію характеризують наступні параметри: $I_j = \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$ – множина операцій, які виконуються на PP_j ; $J_i = \{j_1, j_2, \dots, j_q\}$ – множина робочих позицій, які виконують i -ту операцію; σ_j – коефіцієнт граничного завантаження PP_j , що враховує простій через профілактичні ремонти та технічні огляди, тобто $\sigma_j < 1$, $j = \overline{1, J}$; ω_{ij} – час виконання i -ї операції на PP_j , $i \in I_j$.

Накопичувальна система складається з персональних накопичувачів, оперативного накопичувача та складу. Основними елементами складу є: секції, які об'єднують певну кількість осередків зберігання; вікно (площадка) видання-приймання виробів; автоматичний штабелер. Позначимо E_m – ємність m -ї секції зберігання. Секції поділяються на три групи.

1 – Для зберігання заготовок. По мірі звільнення осередків секції виконується їх заповнення із зовнішніх, по відношенню до розглянутого, складів чи цехів підприємства.

2 – Для зберігання готових виробів. По мірі заповнення цих секцій готова

продукція забирається зі складу.

3 – Для тимчасового зберігання виробів напівфабрикатів на стадії їх обробки. Передавання виробів зі складу в транспортну систему та навпаки здійснюється через вікно видання-приймання виробів. Переміщення виробів всередині складу виконується штабелером.

Математично формальний опис функціонування штабелера аналогічний опису транспортної системи типу „безоператорний візок” чи робокар.

Різниця між складом та оперативним накопичувачем полягає в тому, що час транспортування виробу з будь-якої робочої позиції на склад чи зі складу значно перевищує час, необхідний для аналогічного переміщення з використанням оперативного накопичувача. Крім того, ємність складу значно перевищує ємність оперативного накопичувача.

Транспортна підсистема складається з однієї транспортної одиниці. Це може бути безоператорний транспортний візок, робокар чи локомаційний транспортний робот. В подальшому будемо називати транспортним візком.

Транспортний візок характеризується маршрутом, ємністю, швидкістю V , а також часовими параметрами: час розгону та час гальмування Δt_1 , час фіксації та розфіксації Δt_2 , час завантаження та розвантаження виробів Δt_3 . Безперечно, час, необхідний для переміщення виробу, визначається виразом:

$$2(\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3) + L/V, \quad (6.10)$$

де L – відстань між позиціями.

Оцінка продуктивності основного обладнання полягає в знаходженні максимальної продуктивності на підставі оптимального розподілу потоків виробів різних типів по робочим позиціям для обробки при умовах, що інші елементи виробництва забезпечують відповідне завантаження робочих позицій. В загальному випадку розрахована оцінка продуктивності основного обладнання є найвищою оцінкою виробничої системи, яку можливо досягти при обраному складі обладнання.

Вихідними даними для моделей оцінки продуктивності є планове завдання та характеристики основного обладнання.

Введемо позначення: F – інтенсивність загального потоку виробів, що дорівнює продуктивності; λ_k – інтенсивність потоків виробів k -го типу, $k = \overline{1, K}$. Для k -го виробу можливі різні технології обробки, які створюють множину T_k . Пронумеруємо множину T_k числами $1, \dots, s_k$ де $k = \overline{1, K}$. Тоді λ_{sk} – інтенсивність потоків виробів k -го типу, які оброблюються за технологією s , $k = \overline{1, K}$, $s = \overline{1, S_k}$; λ_{isk} – інтенсивність потоку вимог на виконання операції i , породжуваного потоком виробів k -го типу, який оброблюється за s -тою технологією, $i = \overline{1, I}$, $k = \overline{1, K}$, $s = \overline{1, S_k}$; λ_{jisk} – інтенсивність потоків вимог на виконання операції i , що надходить на j -ту робочу позицію та породжуваного потоком виробів k -го типу, який оброблюється за s -тою технологією, $j = \overline{1, J}$, $i \in I(j)$, $k = \overline{1, K}$, $s = \overline{1, S_k}$.

Для інтенсивності перерахованих потоків виконуються наступні умови.

- 1) Всі інтенсивності є невід'ємними числами, тобто для будь-яких j, i, s, k
- $$\lambda_k \lambda_{sk} \lambda_{isk} \lambda_{jisk} \geq 0. \quad (6.11)$$

- 2) Для інтенсивності потоків виробів будь-якого типу виконуються вимога

$$\lambda_k = \chi_k F, k = \overline{1, K}, \quad (6.12)$$

де χ_k – частка k -го типу виробів в загальному потоці.

- 3) Умова збереження потоку виробів k -го типу

$$\sum_{s=1}^{S_k} \lambda_{sk} = \lambda_k, k = \overline{1, K} \quad (6.13)$$

тобто сумарний потік виробів k -го типу за різними технологіями обробки дає потік виробів k -го типу.

- 4) Потік виробів k -го типу за s -тою технологією інтенсивності λ_{sk} породжує потік такої ж інтенсивності на виконання i -ї операції λ_{isk} , якщо i -та операція є присутньою в k -му типі виробів ($a_{ki}=1$), та потік нульової інтенсивності в іншому випадку ($a_{ki}=0$), тобто

$$\lambda_{isk} = a_{ki} \lambda_{sk}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, s = \overline{1, S_k}. \quad (6.14)$$

- 5) Умова ергодичності

$$\sigma_j = \sum_{i \in I(j)} \omega_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S_k} \lambda_{jisk}, j = \overline{1, J}, \quad (6.15)$$

де σ_j - завантаження j -ї РП; величина $\sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S_k} \lambda_{jisk}$ - інтенсивність потоку вимог на виконання i -ї операції, що надходить на j -ту робочу позицію.

Перераховані вимоги розглядаються як обмеження, яким повинні задовольняти інтенсивності потоків в системі. Тоді задачу про максимальну продуктивність можна сформулювати так: максимізувати продуктивність системи, при обмеженнях, які представлені формулами 6.11 – 6.15.

Можна спростити систему обмежень, виключивши з неї змінні $\lambda_k, \lambda_{isk}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, s = \overline{1, S_k}$. Тоді

$$\sum_{s=1}^{S_k} \lambda_{sk} = \chi_k F, k = \overline{1, K} \quad (6.16)$$

$$\sum_{j \in I(i)} \lambda_{jisk} = a_{ki} \lambda_{sk}, i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}, s = \overline{1, S_k} \quad (6.17)$$

$$\sum_{i \in I(j)} \omega_{ij} \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S_k} \lambda_{jisk} \leq p_j, j = \overline{1, J} \quad (6.18)$$

$$F, \lambda_{sk}, \lambda_{jisk} \geq 0 \text{ для будь яких } j, i, s, k \quad (6.19)$$

$$F \rightarrow \max \quad (6.20)$$

Таким чином, побудована модель є задачею лінійного програмування, в якій кількість обмежень дорівнює $K + J + IK\bar{S}$, а кількість змінних – $1 + K\bar{S} + IJK\bar{S}$

$$\bar{S} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K S_k, \quad (6.21)$$

де \bar{S} - середня кількість технологій, за якими можуть оброблятися вироби певного типу;

$\bar{J} = \frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I |J(i)|$ – середня кількість робочих позицій, які виконують однакову операцію. Отже маємо, що оцінка якості продуктивності основного обладнання представляється математичною моделлю, розв'язання якої можливе методами лінійного програмування.

Як приклад імітаційного моделювання за допомогою мереж Петрі наведемо роботу ділянки механічної обробки деталей, що складається з чотирьох верстатів: двох горизонтально-фрезерних верстатів, багатошпиндельного свердлильного верстата та плоскошліфувального верстата (рис. 6.6). Відомі операції, що виконуються на цих верстатах та час їх виконання. Початковими даними для моделювання є час виконання свердлильної операції В1, фрезерних операцій В2 та В3 та шліфувальної В4, а також розмір партії деталей, що поступає на обробку, та час квантування інформації.

Алгоритм імітаційного моделювання роботи ділянки механічної обробки деталей наведено в додатку Д (рис. Д.1). Алгоритми процедур, що входять в основний алгоритм, представлено на рис. Д.2 – Д.7.

В додатку Е на рис.Е.1 – Е.6 наведено стан мережі через 2, 2.5, 3, 3.5, 7,5 та 8 хвилин після початку обробки деталей. На даних рисунках вказано відповідні стани позицій та переходів.

Моделювання системи за допомогою теорії мереж Петрі, робить можливим отримання важливої інформації про структуру та динамічну поведінку системи. Ця інформація корисна для оцінки системи та розгляду пропозицій з її удосконалення та зміни.

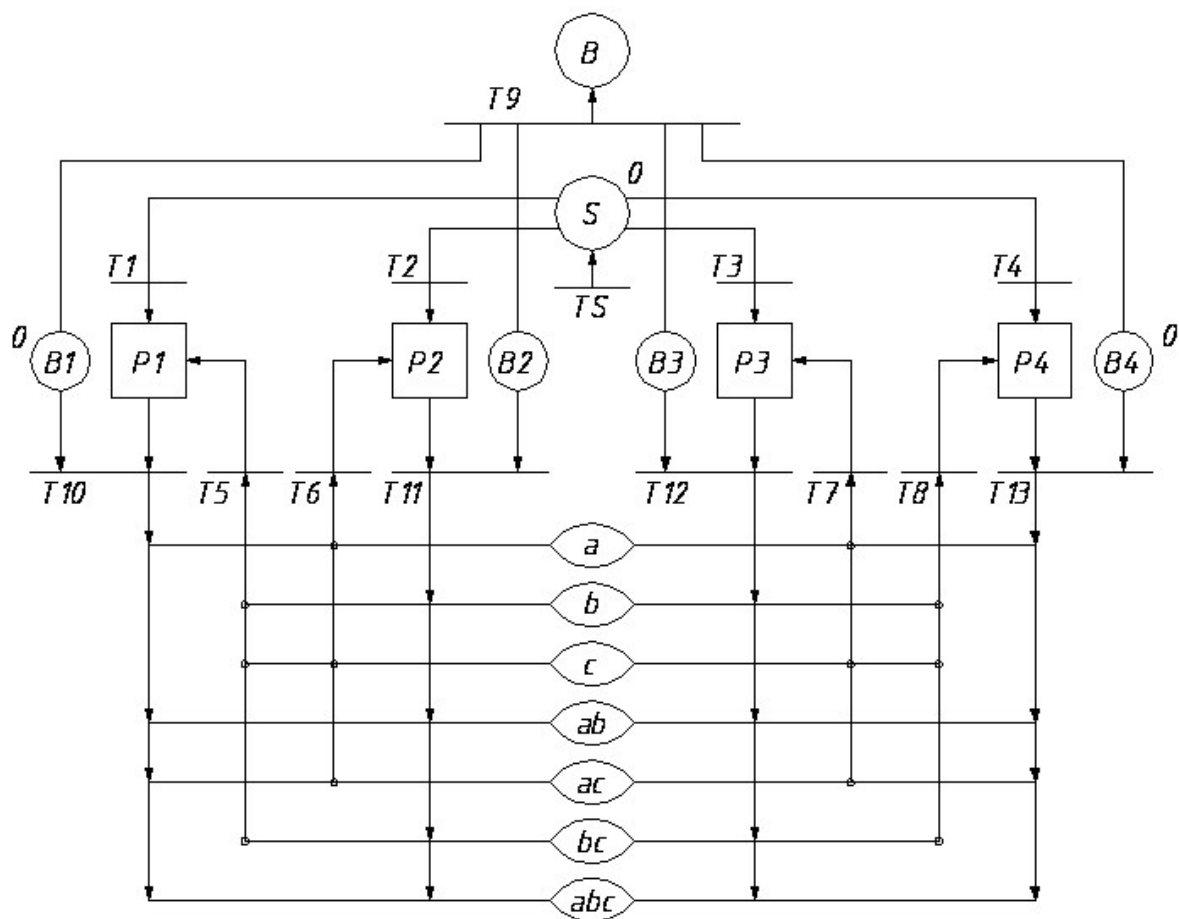


Рис. 6.6. Граф мережі Петрі, що моделює виробничу дільницю.

Використання апарату мереж Петрі для моделювання роботи виробничих систем має певні особливості. Використовуваний умовно - подійний підхід дозволяє суттєво спростити формалізацію початкових даних, зберігаючи при цьому важливу інформацію про внутрішні зв'язки між окремими елементами системи, абстрагуватися від параметру часу в системі, розглядаючи лише переходи системи з одного стану до іншого.

Методика моделювання та оптимізації роботи виробничої системи складається з двох частин: перша – визначає оптимальну послідовність завантаження обладнання на основі аналітичного моделювання, друга – моделює виробничу систему методами мереж Петрі.

Узагальнений алгоритм аналітичного моделювання та оптимізації роботи виробничих систем наведено на рис. 6.7. Програмна реалізація розроблених алгоритмів виконана на мові C++, у відповідності зі стандартами ANSI.

6.5.2 Автоматизована система моделювання завантаження технологічного обладнання

Методику моделювання роботи виробничої системи засобами мереж Петрі реалізовано в вигляді автоматизованої системи, структурну схему якої наведено на рис 6.8 [6.11].

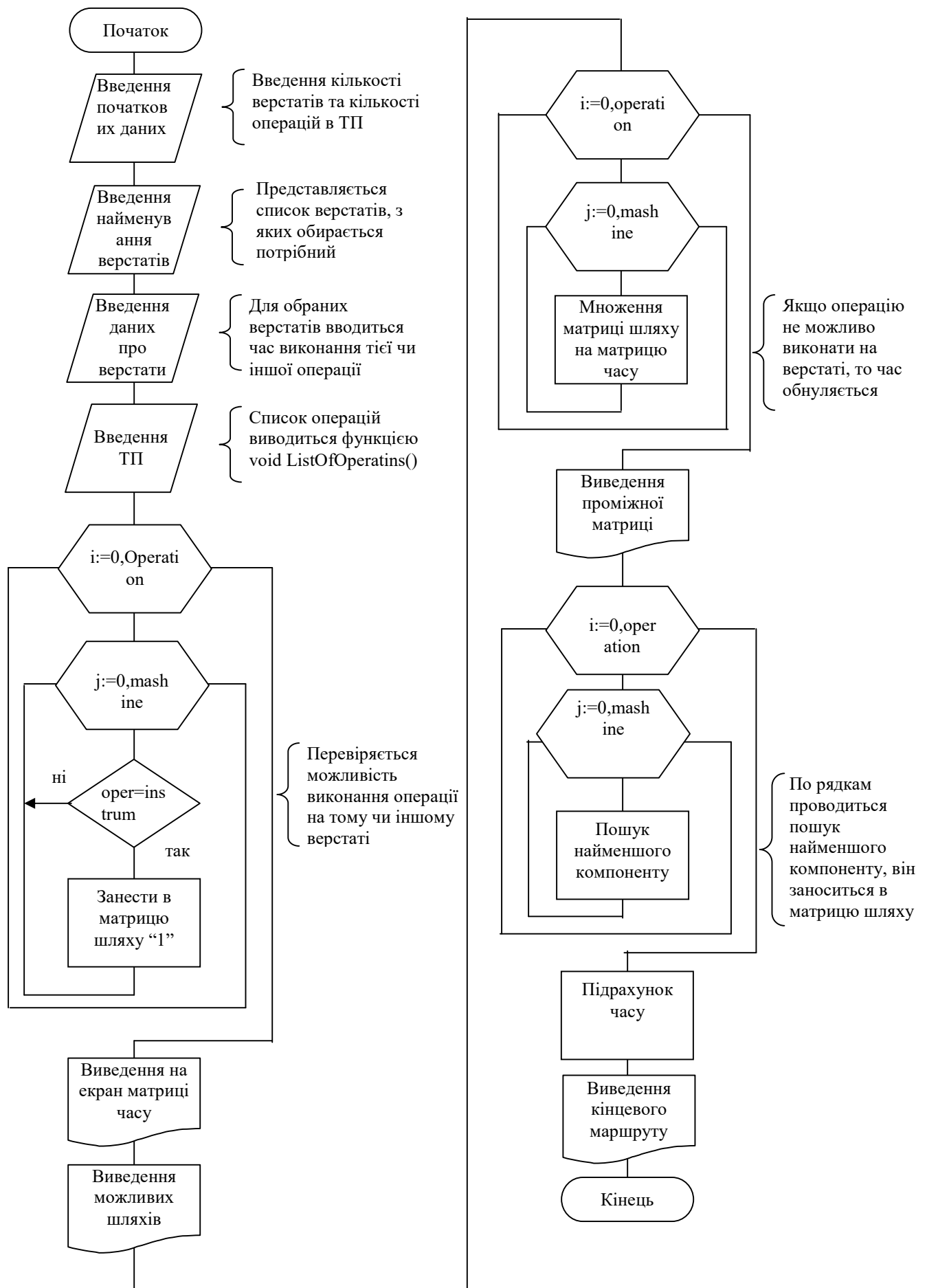


Рис. 6.7. Узагальнений алгоритм моделювання та оптимізації завантаження обладнання виробничих систем.

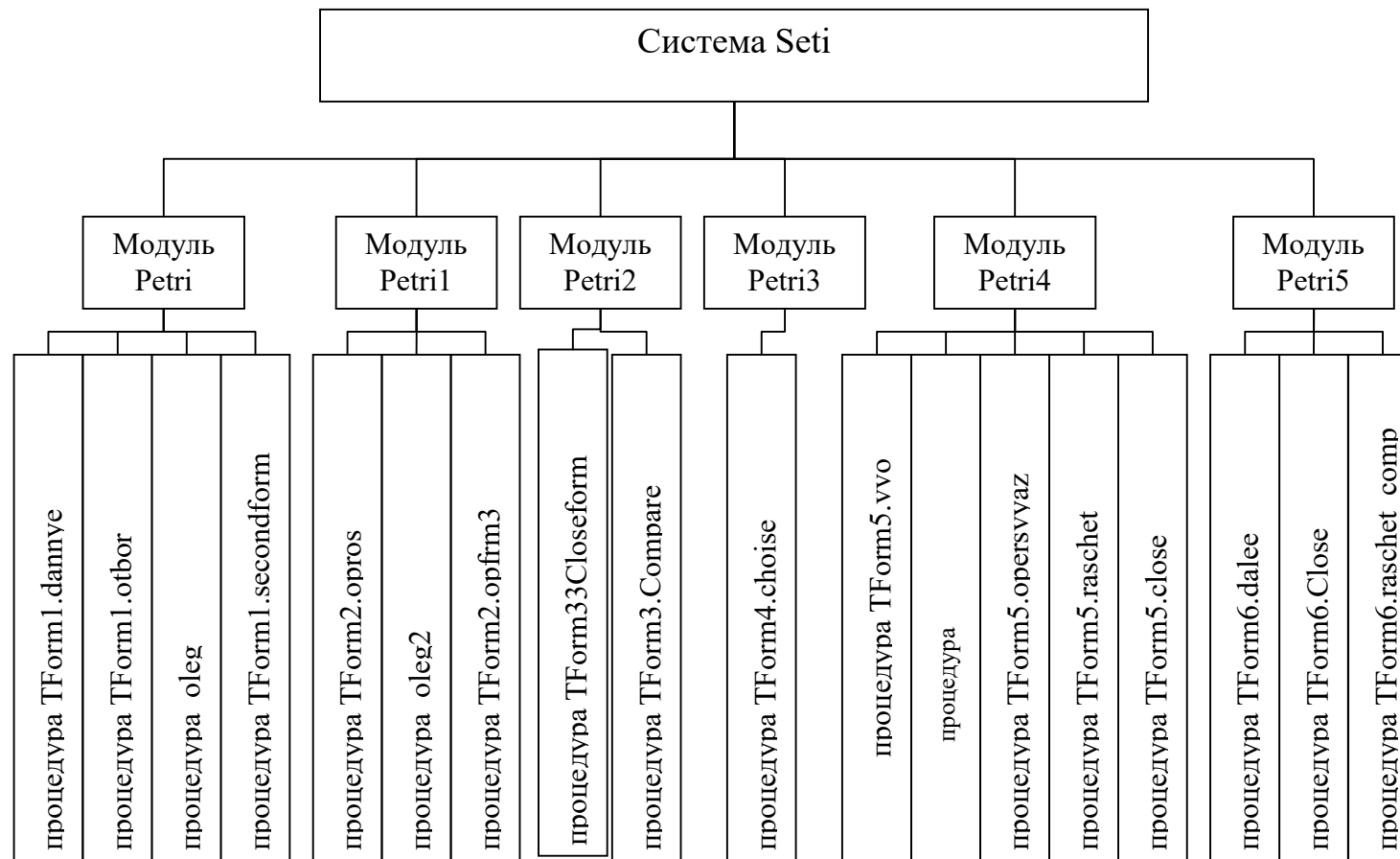


Рис. 6.8. Структурна схема автоматизованої системи імітаційного моделювання виробничих систем засобами мереж Петрі.

Система складається з шести модулів (Petri, Petri1, Petri2, Petri3, Petri4, Petri5) та файлу проекту Seti.exe. Модуль Petri відповідає за перший етап введення початкових даних для моделювання та оптимізації роботи цеху механічної обробки. Модуль Petri1 відповідає за другий етап введення початкових даних для моделювання та оптимізації роботи цеху механічної обробки та безпосередньо здійснює моделювання та оптимізацію. Модуль Petri2 пов'язаний з вікном виведення результатів моделювання модуля Petri1.

Модуль Petri3 відповідає за вибір системи, що буде моделюватися – цех механічної обробки деталей або складальний цех. Модуль Petri4 відповідає за введення початкових даних для моделювання роботи складального цеху та виконує дане моделювання. Модуль Petri5 призначений для моделювання роботи цеху механічної обробки при виконанні робіт традиційним методом.

Програмна реалізація алгоритмів виконана на об'єктно орієнтованій мові програмування DELPHI 5.

Система дозволяє проводити моделювання та оптимізацію роботи різноманітних виробничих систем, а саме цеху механічної обробки деталей та складального цеху. Інтерфейс системи представлено в вигляді сукупності вікон, використання яких значно спрощує процес моделювання роботи виробничої системи та отримання відповідних результатів.

Після завантаження файлу системи Seti.exe. з'являється вікно, що дозволяє вибрати вид виробничої системи, що моделюється (рис. 6.9).

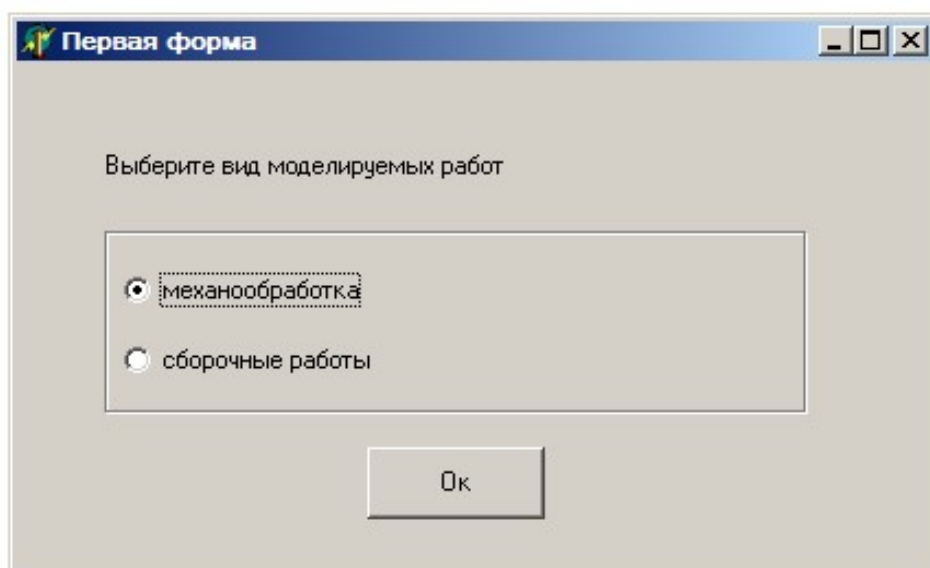


Рис. 6.9. Вікно вибору виду системи, що моделюється.

У випадку вибору системи механічної обробки деталей з'являється вікно, що дає можливість ввести початкові дані для роботи систем – кількість верстатів, технологічних операцій та розмір партії деталей (рис. 6.10).

Механообработка

Введите количество используемых станков

Введите количество технологических операций

Введите количество деталей в партии

Нажмите кнопку Далее

Мемо1

Рис. 6.10. Вікно введення початкових даних для моделювання системи механічної обробки деталей.

На наступному етапі введення початкових даних використовується вікно, що показано на рис. 6.11. В цьому вікні треба вказати види операцій, які можна виконати на кожному з верстатів.

Механообработка

Введите количество используемых станков

Введите количество технологических операций

Введите количество деталей в партии

Нажмите кнопку Далее

Укажите операции, выполнимые на станке 1

☐ Токарная

☒ Фрезерная

☒ Сверлильная

☐ Шлифовальная

☐ Полировальная

Рис. 6.11. Вікно введення додаткової інформації для системи механічної обробки деталей.

За допомогою наступного вікна (рис. 6.12) здійснюється введення часу виконання кожної операції технологічного маршруту механічної обробки деталі.

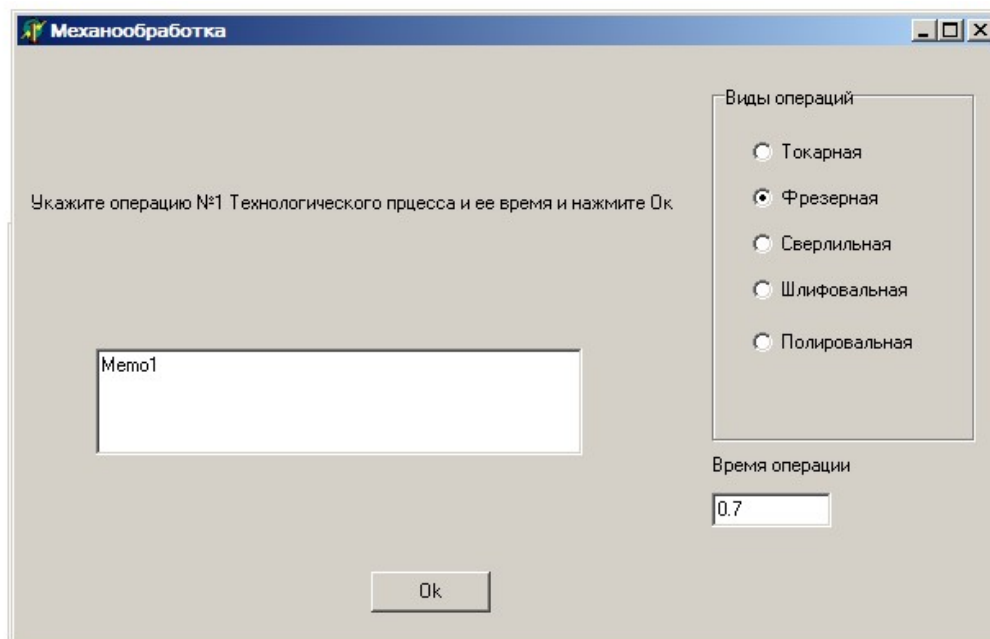


Рис. 6.12. Вікно введення часу виконання технологічної операції.

Після введення початкових даних та запуску процесу моделювання отримуємо результати, що наведені в відповідному вікні системи (рис. 6.13).

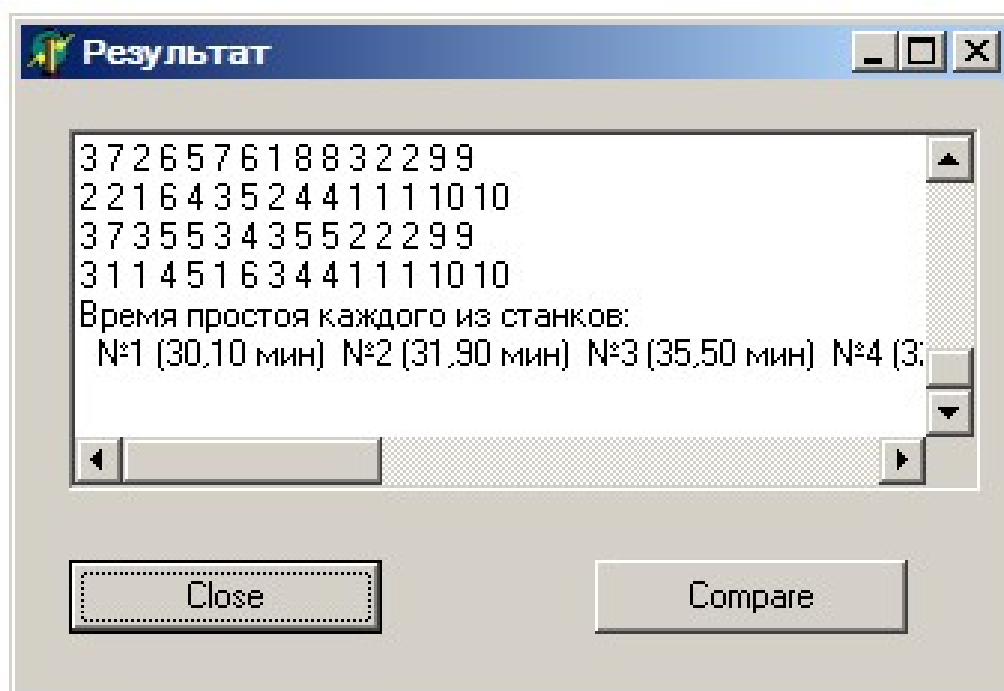


Рис. 6.13. Вікно результатів моделювання роботи цеху механічної обробки деталей.

Ця віконна форма має дві кнопки. В разі натиснення кнопки „Close” відбувається закриття форми та завершення роботи системи. Якщо натиснути кнопку „Compare”, з’явиться вікно, що показано на рис. 6.14.

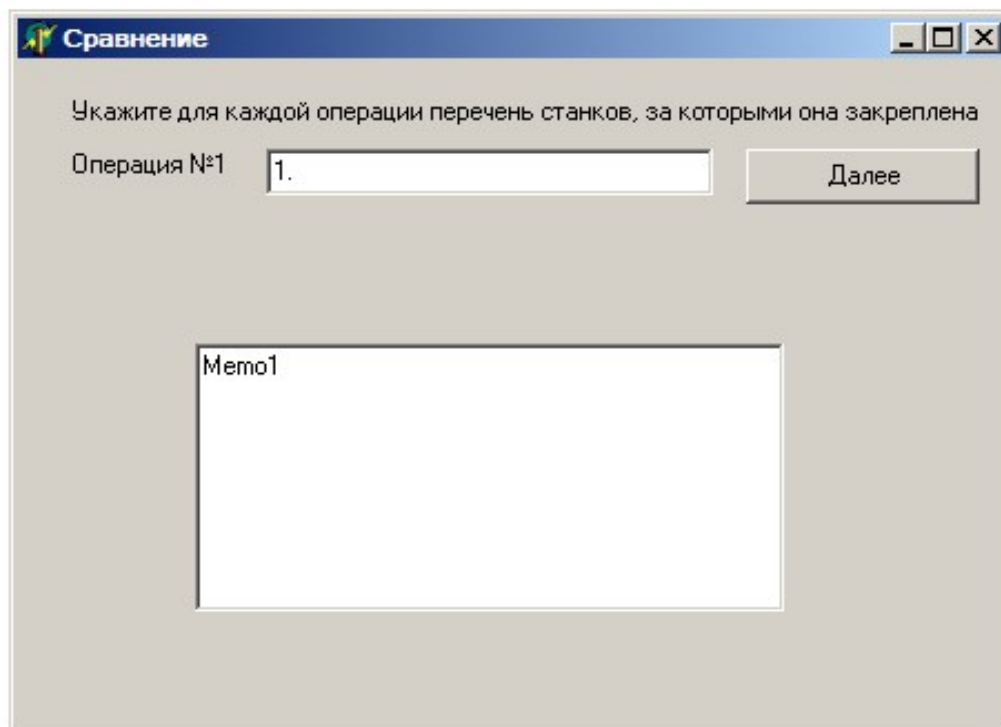


Рис. 6.14. Вікно введення номерів верстатів та прив’язки до них окремих операцій.

Дане вікно призначене для прив’язки операцій до верстатів з метою моделювання роботи цеху механічної обробки з традиційною організацією виробничого процесу. Результати моделювання виводиться у вікні, що показано на рис. 6.15.

Для завершення процесу моделювання необхідно натиснути кнопку „Close” або просто закрити вікно стандартним способом.

При розв’язанні задачі моделювання роботи складального цеху необхідно в формі, що показана на рис. 6.9, вибрати пункт „Сборочные работы” та натиснути кнопку „ОК”. В результаті цього з’явиться вікно, що наведено на рис. 6.16, в якому треба вказати кількість операцій технологічного процесу складання, кількість робочих місць та кількість виробів в партії. Далі з’являються тимчасові вікна, одне з яких показано на рис. 6.17, де потрібно вводити кількість переходів для кожної операції.

Після цього необхідно у тимчасовому вікні, зображеному на рис. 6.18, ввести час виконання кожної операції та кожного переходу.

Сборка

Введите количество операций техпроцесса сборки

Введите количество рабочих мест

Введите количество изделий в партии

Memo2

Далее

Рис. 6.15. Вікно виведення результатів моделювання роботи цеху механічної обробки з традиційною організацією виробничого процесу.

Сравнение

Укажите для каждой операции перечень станков, за которыми она закреплена

Операция №15

Далее

Ok

Memo1

№1 (14,50 мин) №2 (33,50 мин) №3 (30,50 мин)
 №4 (20,50 мин) №5 (16,50 мин) №6 (33,50 мин)
 №7 (38,50 мин) №8 (43,50 мин) №9 (25,50 мин)
 №10 (15,50 мин)

Close

Рис. 6.16. Вікно введення початкових даних для моделювання роботи складального цеху.

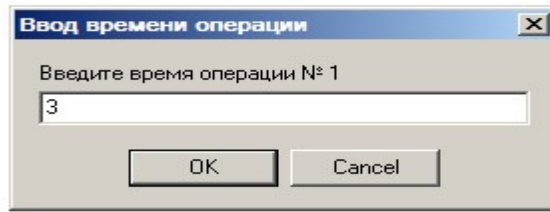


Рис. 6.17. Вікно введення кількості переходів в операції.

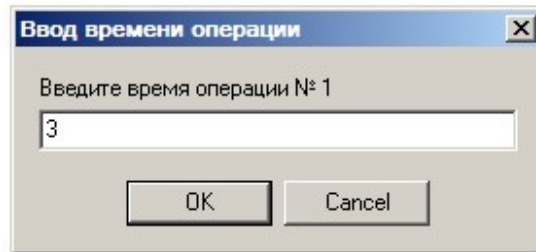


Рис. 6.18. Вікно введення часу виконання операції.

Далі потрібно в тимчасовому вікні, показаному на рис. 6.19, ввести номер останньої операції.

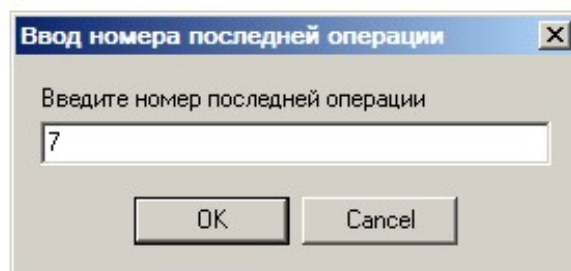


Рис. 6.19. Вікно введення номеру останньої операції.

Після цього на формі з'явиться кнопка „Далее”, яку необхідно натиснути. В результаті цього в формі з'являються додаткові елементи, де необхідно для кожної операції вказати перелік операцій, що мають з нею прямий зв'язок. Приклад цього введення наведено в формі під відповідним полем. Якщо операція не має жодної пов'язаної з нею прямою операції, тоді необхідно поставити знак „—”. Після введення всіх зв'язків на формі з'явиться кнопка „Далее”, яку необхідно натиснути з метою здійснення моделювання. Результати моделювання виводиться у полі в нижній частині вікна (рис. 6.20).

Для завершення роботи з системою необхідно натиснути кнопку „Close”.

В якості прикладу використання автоматизованої системи для моделювання роботи цеху механічної обробки розглянуто технологічний процес виготовлення корпусної деталі, який складається із 35 різноманітних операцій – 17 токарних, 8 фрезерних та 10 свердлильних операцій. Розмір партії деталей складає 50 шт.

Рис. 6.20. Вікно виведення результатів моделювання роботи складального цеху.

Фрагмент мережі Петрі, що зображає структуру цеху механічної обробки деталі „Корпус” наведено на рис.6.21.

Аналіз даних, що були отримані при проведенні моделювання роботи обладнання при механічній обробці деталей показує, що при використанні розробленої системи досягається значне скорочення часу простою обладнання.

В окремих випадках можливо досягти скорочення часу простою в 5 – 8 разів. Як наслідок, значно скоротився цикл виготовлення всієї партії деталей з 588,16 хв. – при класичній організації виробничого процесу до 346,95 хв. – при використанні результатів моделювання за допомогою розробленої системи. Результатом моделювання та оптимізації системи механічної обробки деталей є маршрут пересування кожної деталі по цеху у вигляді набору номерів верстатів а також тривалість виготовлення всієї партії деталей. Використання розробленої системи моделювання та оптимізації дозволить скоротити виробничі затрати та як наслідок, собівартість виготовлення деталей та виробів.

Наведемо також приклад використання розробленої системи з метою моделювання технологічного процесу складання виробу „Крісло - коляска з електроприводом, модель 215”.

Фрагмент мережі Петрі, що описує технологічний процес складання вказаного виробу наведено на рис. 6.22.

Результатом моделювання є час простою кожного з робочих місць, а також тривалість виготовлення всієї партії виробів. Ця інформація аналізується

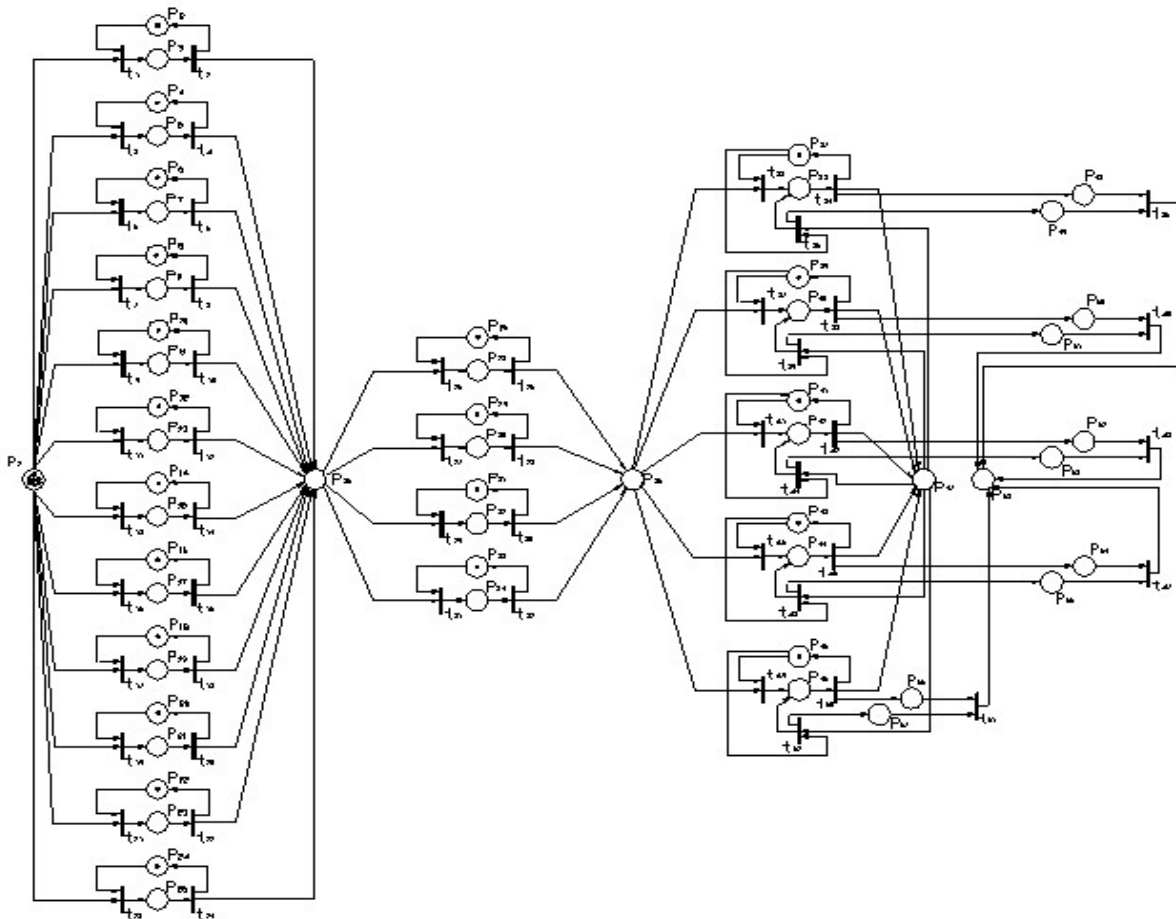


Рис. 6.21. Фрагмент мережі Петрі, що моделює процес механічної обробки деталі „Корпус”.

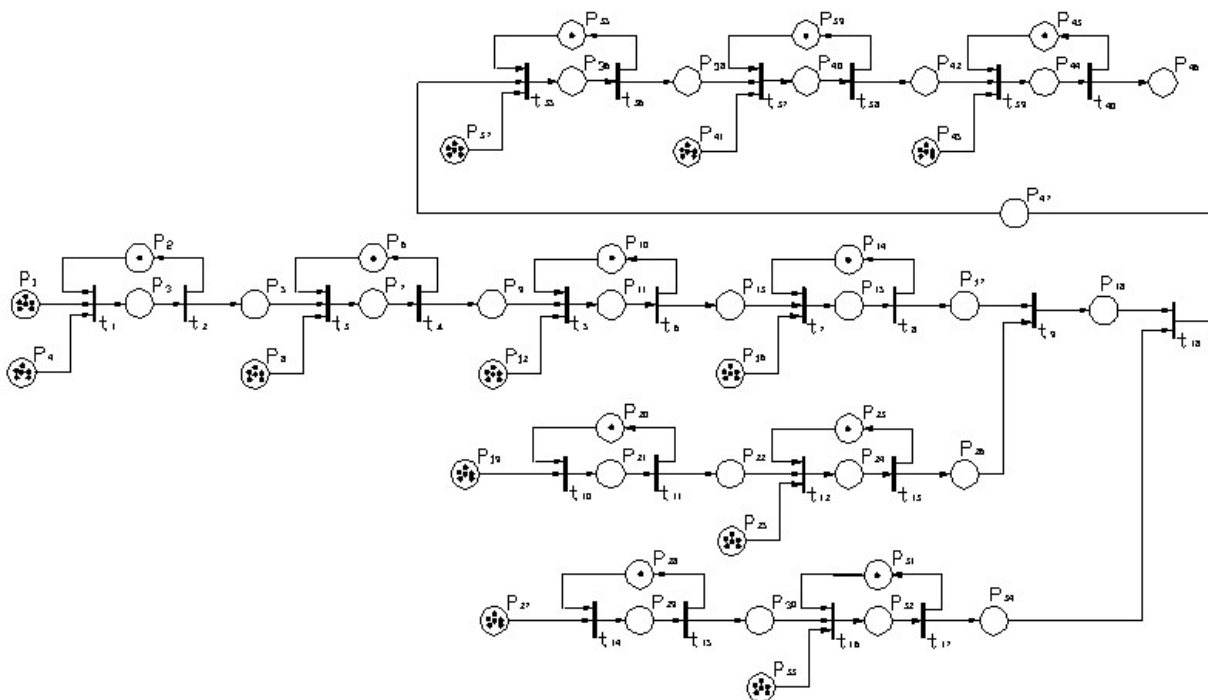


Рис. 6.22. Фрагмент мережі Петрі, що зображає процес складання виробу.

та приймаються відповідні рішення стосовно структури та організації процесу складання.

Висновки до розділу

В розділі теоретично обґрунтовані та практично реалізовані математичні методи моделювання виробничих систем, що дозволяють вибрати раціональні умови їх роботи.

Показано, що підвищення ефективності приладобудівного виробництва можна досягнути шляхом моделювання та оптимізації завантаження обладнання виробничих систем.

Аналіз методів моделювання виробничих систем показав, що при розв'язанні цієї задачі доцільно застосовувати сучасні методи математичного та імітаційного моделювання, що базуються на використанні структурно-логічного підходу до математичного моделювання систем та їх імітаційного моделювання методами мереж Петрі.

Методи нескінченнозначної логіки та логічних визначників дозволяють виконати опис математичної моделі виробничої системи та її характеристик, а метод гілок та меж – здійснити оптимізацію її роботи. Основні положення нескінченнозначної логіки та порядкових визначників, на яких ґрунтується структурно-логічний підхід до дослідження складних систем, до яких відносяться і виробничі системи в приладобудуванні, дозволяють створити математичну модель роботи системи довільної структури.

Наведені алгоритми та програми, що реалізують вказані методи моделювання виробничих систем та оптимізацію їх роботи, дозволяють підвищити ефективність роботи цих систем.

Реальне застосування наведених методів моделювання виробничих систем дозволяє зменшити невиробничі втрати часу, тим самим зекономити ресурси виробництва без застосування будь-яких інших заходів адміністративного або технічного характеру.

Перелік посилань до розділу 6

6.1 Антонюк В.С., Выслоух С.П. Оптимальное использование оборудования в условиях ГАП //Сб.Труды Респ.науч.-техн.конфер. Ворошиловград: Изд-во Ворошил. об-во "Знание". 1986. – С. 120 – 122.

6.2. Антонюк В.С., Выслоух С.П. Оптимизация загрузки оборудования гибких производственных систем // Технология и автоматизация машиностроения. Респ.межвед. науч.-техн.сб.- Київ: Технік.а 1988. Вып.42. – С. 5-11.

6.3. Антонюк В.С., Выслоух С.П. Оптимизация загрузки в ГПС //Сб."Повышение производительности и качества продукции в условиях гибкой автоматизации машино и приборостроения".- Севастополь: Изд-во "Знание". 1988.

6.4. Выслоух С.П., Держук В.А. Оптимизация загрузки оборудования при выполнении ремонтных работ. //Сб. «Технология ремонта машин, механизмов и оборудования» (Ремонт – 99). Материалы 7-й международной конференции 25 – 27 мая 1999 года, г. Алушта. – Киев:, 1999. – С.31-32.

6.5. Выслоух С.П. Повышение эффективности выполнения механосборочных работ путем оптимизации загрузки оборудования. //Сб. „Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы”. Материалы научно-технической конференции «Шлифабразив -2000», Волжский , 2000. – С. 229 -232.

6.6. Вислоух С.П., Красноштан С.В. Моделювання та оптимізація завантаження обладнання швидкопереналагоджувальних виробничих систем. //Сб. Інтеграція освіти, науки та виробництва (матеріали V міжнародної науково-методичної конференції) 26-29 вересня 2001 р. Луцьк, 2001. – С. 139 – 142.

6.7. Деклараційний патент на корисну модель. № 14681 UA, B23Q 41/08. Система завантаження узагальнених виробничих систем складання. / Вислоух С.П., Філіппова М.В. Бюл. № 5, 2006.

6.8. Вислоух С.П., Піпко А.В. Моделювання завантаження обладнання виробничих систем з використанням структурно-логічного методу. /Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. Випуск 33, 2007. – С. 117–124.

6.9. Вислоух С.П. Математичне моделювання технологічних систем. //Приладобудування 2004: стан і перспективи: Збірник тез доповідей науково-технічної конференції. -Київ : НТУУ “КПІ”, 2004. – С. 65-66 .

6.10. Вислоух С.П. Автоматизированное моделирование и оптимизация работы производственных систем. // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте. Материалы 8-го Международного научно-технического семинара (26-28 февраля 2008 г., г. Свалява, Карпаты). – Киев, 2008. – С. 41-43.

6.11. Вислоух С.П., Чабан О.М. Моделювання та оптимізація роботи обладнання виробничих систем методами мереж Петрі. /Вісник НТУУ „КПІ”. Серія приладобудування. – 2008. – Вип. 35. – С. 118–123.

- 6.12. Фролов В. Н., Львович Я. Е., Меткин Н. П. Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Конструирование и технология радиоэлектронных средств» – М.: Высш. шк., 1991. – 463 с.
- 6.13. Левин В.И. Математические методы в технической кибернетике. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981. – 74 с.
- 6.14. Левин В.И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
- 6.15. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 158 с.
- 6.16. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
- 6.17. Єфіменко Н.А. Постановка та формулювання задач оптимального управління технологічним процесом машинобудівного виробництва. / Вісник ЧДТУ, 2002, № 2. – С. 9–13.
- 6.18. Горнев В.Ф. Интеграция систем управления операционной технологией в ГПС. / Вестник машиностроения, 1992, №10–11. – С. 35–37.
- 6.19. Хаустова А.Ф. Формалізація проектних рішень формування структур об'єктів технологічного проектування. Автореф. дис. к.т.н.. Донецький держ. техн.. університет.– Донецьк, 2000. – 21 с.
- 6.20. Капустин Н.М., Волков О.Ю., Цехмейструк В.А. Синтез структуры операций при изготовлении в гибком автоматизированном производстве. // Изв. вузов, Машиностроение, 1984 г., N7. – С. 144-148.
- 6.21. Wang Hai. Разработка технологических процессов с использованием теории графов. / Jixie zhizao Machinery. 1995, № 9. – С. 23–25 (кит.).
- 6.22. Способ разработки технологических процессов. Method for deciding of machining. Пат. 5369870 США, МКИ 5B23P13/04. /Ouchi Sadami, Fudjita Satory; Mitsubishi Denki R.R. – №21781.
- 6.23. Братухин А.Г., Талалаев В.Д., Карасев Б.Е., Логунов А.В. Тенденции и перспективы развития современной технологии и организации производства авиационных двигателей. / Вестник машиностроения, 1992, №3. – С. 3–19.
- 6.24. Баборица С.А. Про проблеми діагностики складних систем. // Сучасне машинобудування, 2000, №1-2 (3-4). – С. 14-15.
- 6.25. Ларшин В.П. Интегрированные производственные системы в машиностроении. / Сучасне машинобудування, 2000, №1–2 (3–4). – С. 141–147.
- 6.26. Капустин Н.М., Кузнецов П.М. Формирование виртуальной производственной системы для выпуска изделий в распределенных системах.// Машиностроитель. – М.: 2002, вып. 6. – С. 42–46.
- 6.27. Бухсин Ф. Разработка моделей функционирования и методов управления участками гибкого автоматизированного производства: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Донецк, 1997. – 19 с.
- 6.28. Вакуленко О.С. Розробка та дослідження алгоритмів оперативного планування взаємопов'язаних виробничих процесів в одиничному та дрібносерійному виробництві: Автореф. дис. канд. техн. наук. – К.: 2001. – 19 с.

- 6.29. Кульба В.В., Волков А.Е., Климов А.А., Швецов А.Р. Анализ и синтез систем контроля защиты данных с использованием сетей Петри. – Тольятти: Междунар. акад. бизнеса и банк. дела, 1998. – 239 с.
- 6.30. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. – М.: Мир, 1967. – 470 с.
- 6.31. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
- 6.32. Венцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Высшая школа, 2001. – 208 с.
- 6.33. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. – К.: ВОПЛ, 2001. – 684 с.
- 6.34. Таха Х.А. Введение в исследование операций. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 912 с.
- 6.35. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
- 6.36. Алексеев О. Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. – М.: Наука; 1987. – 247 с.
- 6.37. Горбатов В.А. Основы дискретной математики. – М.: Высшая школа, 1986. – 310 с.
- 6.38. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику: Уч. пос. для вузов по спец. «Прикладная математика». – М.: Наука, 1986. – 384 с.
- 6.39. Кузнецов О.П., Адельсон-Вольский Г.М. Дискретная математика для инженера. – М.: Энергоиздат, 1988. – 479 с.
- 6.40. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. – М.: Мир, 1971. – 214 с.
- 6.41. Бенерджи Р. Теория решения задач. Подход к созданию искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1972. – 224 с.
- 6.42. Вунш Г. Теория систем. /Пер. с нем. – М.: Советское радио, 1978. – 288 с.
- 6.43. Шилейко А.В. и др. Введение в информационную теорию систем. /А.В. Шилейко, В.Ф. Кочнев, Ф.Ф. Химушкин; Под ред. А.В. Шилейко. – М.: Радио и связь, 1985. – 278 с.
- 6.44. Мидоу Ч. Анализ информационных систем. – М.: Прогресс, 1977. – 400 с.
- 6.45. Советов Б.Я. Яковлев С.А. Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
- 6.46. Дубинин В.Н., Зинкин С.А., Кулагин В.П. Система моделирования на основе сетей Петри. – Л.: Наука, 1983. – 188 с.
- 6.47. Гордеев А.В., Молчанов А.Ю. Применение сетей Петри для анализа вычислительных процессов и проектирования вычислительных систем.: Учеб. пособие / Гордеев А.В., Молчанов А.Ю.; Санкт-Петербург. гос. акад. аэрокосмич. приборостроения. – СПб.: СПб ГААП, 1993. – 80 с.
- 6.48. Мамиконов А.Г., Деметрович Я., Кульба В.В. и др. Использование сетей Петри при проектировании систем обработки данных. – М.: Наука, 1988. – 103 с.

- 6.49. Кузьмук В.В. Сети Петри и моделирование параллельных процессов. – К.: ИМПЭ, 1985. – 62 с.
- 6.50. Лескин А.А. Моделирование процессов алгебраическими сетями Петри. – Л.: ЛИИАН, 1987. – 32 с.
- 6.51. Лескин А.А. Сети Петри в моделировании и управлении. – Л.: Наука, 1989. – 135 с.
- 6.52. Новиков Я.А., Тропашко В.В. Структурное проектирование алгоритмов логического управления технологическими процессами. Модель взаимосвязанных автоматных сетей Петри. – Минск: ИТК, 1989. – 46 с.
- 6.53. Васильев В.В., Кузьмук В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. – К.: Наукова думка, 1990. – 212 с.
- 6.54. Долгий А.Б. Сети Петри и их использование при моделировании дискретных систем и процессов: Метод. пособие по курсу «Прикл. математика» для спец. «Электрон. вычисл. машин». – Минск: МРТИ, 1991. – 46 с.
- 6.55. Кузьмук В.В., Лисицин Е.Б. Моделирование параллельных процессов с использованием аппаратных сетей Петри. – К.: ИПМЭ, 1988. – 39 с.
- 6.56. Туева Н.С. Моделирование диалоговых систем с помощью сетей Петри. – М.: ВЦ РАМ, 1991. – 118 с.
- 6.57. Кучеренко Є.І. Інтелектуальні технології моделювання та аналізу взаємодіючих процесів розширеними інтерпретованими нечіткими мережами Петрі. //Вісник Технологічного університету Поділля №3, 2002. – С. 118–121.
- 6.58. Рыжов В.А. Динамические сети Петри. – М.: ВЦ АН СССР, 1988. – 23 с.
- 6.59. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
- 6.60. Буренков М.В. Синтез структур гнучких обробних модулів на основі імітаційного моделювання: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / НТУ "Харківський політехнічний ін-т". – Х., 2002. – 18с.
- 6.61. Имитационное моделирование производственных систем / Под ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. – 416с.
- 6.62. Дойчинова Г.С. Имитационное моделирование гибких производственных систем: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Донецк, 1997. – 19 с.

РОЗДІЛ 7

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОБРОБЛЮВАНOSTІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗАННЯМ

Приладобудування, як і багато інших галузей промисловості, має потребу в матеріалах, які, володіючи добрими експлуатаційними якостями, у той же час забезпечили б максимальну продуктивність процесу виготовлення деталей та низьку собівартість готової продукції. Важко переоцінити важливість роботи зі створення таких матеріалів. Однак прискорення розвитку досліджень у цій області гальмується складністю визначення оброблюваних характеристик цих матеріалів, тобто здатність їх піддаватися обробці.

Обробка матеріалів різанням, як основний метод виготовлення деталей, є надзвичайно складним фізичним процесом, що у різних напрямках впливає на технологічну обробку систему: різальний інструмент, деталь і верстат. Тому оброблювані властивості матеріалів не можуть бути охарактеризовані яким-небудь одним параметром – вони містять у собі кілька характеристик. До таких основних характеристик можна віднести:

- оброблюваність матеріалу з погляду впливу процесу різання на інструмент;
- оброблюваність матеріалу з погляду величини зусиль різання;
- оброблюваність матеріалу з погляду якості виробу.
- оброблюваність з погляду характеру утворення та форми стружки тощо.

Вибір найбільш важливої характеристики оброблюваності на основі конкретних вимог щодо виконуваної операції на практиці не має утруднень.

З точки зору визначення оброблюваності матеріалу, варто розрізняти реальну (абсолютну) та відносну його оброблюваність [7.1 –7.5].

Знання реальної оброблюваності матеріалу необхідно при розробці керуючих документів з призначення режимів різання та технічного нормування робіт. Воно припускає одержання для різних процесів обробки (точіння, свердління, фрезерування тощо) та умов різання (режими різання, параметри та геометрія різального інструменту, умови охолодження тощо) залежностей вихідних характеристик процесу різання від початкових даних.

Для отримання даних про відносну оброблюваність досить при обробці досліджуваного матеріалу у визначених умовах різання, що прийняті у якості стандартних, установити величину $V_{ек}$ (наприклад, V_{60} при точінні) або силу різання P . Відношення вибраної величини параметра порівняння досліджуваного матеріалу до відповідної характеристики матеріалу, що взятий за еталон, дає уявлення про відносну оброблюваність матеріалу і може бути прийняте за основу при оцінці його оброблюваності [7.6, 7.7]. Аналогічно можна визначити відносні оброблюючі характеристики інструментального матеріалу.

Визначення відносної оброблюваності вимагає створення однакових умов різання для порівнюваних матеріалів і проведення нових дослідів для кожної пари матеріалів. Цей процес займає досить багато часу при тому, що в

результаті ми одержуємо лише частковий показник властивості за окремим параметром порівняння.

Для визначення відносної оброблюваності застосування прискорених методів дослідження є особливо актуальним. Відома велика кількість прискорених методів дослідження, оснований на всіляких принципах, але їх практичне використання не завжди є ефективним [7.6 – 7.11].

Прискореного методу, що в повній мірі задовольняє вимогам зручного і якісного визначення оброблюваності, дотепер не існує. Як альтернативне рішення зазначеної проблеми з визначення відносної й реальної оброблюваності, при якому пропонується відмовитися від „класичного” підходу і поставити у відповідність безпосередньому процесу різання його математичну модель, що цілком відтворює його з технологічної точки зору. Для одержання такої моделі достатньо провести короткочасні експерименти і потім використовувати їх результати для отримання математичних моделей вихідних параметрів процесу різання як основу для визначення оброблюваності. Це дозволить здійснювати порівняння оброблюваних матеріалів за обраними параметрами із заданими режимами, не здійснюючи додаткові експериментальні дослідження. Всю необхідну інформацію про процес обробки можна отримати в результаті безпосереднього моделювання [7.12 – 7.16].

Тому в даному розділі розглядаються питання розробки методики визначення оброблюваності різанням конструкційних матеріалів на основі математичного моделювання технологічних параметрів. Для проведення короткострокових експериментальних досліджень запропоновано використовувати автоматизований стенд. Розроблена методика отримання адекватних математичних моделей вихідних параметрів процесу різання на основі обробки результатів експериментальних досліджень, що заносяться в базу знань. Наводиться методика використання отриманих математичних моделей параметрів обробки конструкційного матеріалу відповідним інструментом для визначення відносної оброблюваності конструкційного матеріалу в порівнянні з вибраним еталоном за окремими показниками процесу різання та за комплексним показником з врахуванням їх експертних оцінок та реальних умов обробки. Дано визначення реальної оброблюваності конструкційного матеріалу, що розраховується шляхом оптимізації режимів різання згідно з вибраним критерієм з використанням математичних моделей окремих показників обробки конструкційного матеріалу, які знаходяться в базі знань.

7.1 Вибір методу і розробка алгоритму одержання математичних моделей

Як уже відзначалося раніше, складність визначення технологічних параметрів матеріалів, особливо їх оброблюваності, полягає в нестаціонарності процесів механічної обробки. Тому практично не представляється можливим відтворення абсолютно ідентичних умов різання, необхідних для розрахунку

відносної оброблюваності, а дискретність реєстрації значень необхідних характеристик в процесі експерименту та їх наступна графічна інтерпретація з метою отримання оптимальних рішень у багато разів знижує вірогідність визначення реальної оброблюваності. При цьому не останню роль відіграє часовий фактор. Значні витрати часу, що пов'язані з проведенням експериментальних досліджень і наступною обробкою отриманих результатів багато в чому відштовхують технологів від безпосереднього застосування на виробництві теорії оброблюваності матеріалів.

В даний час основним підходом з призначення робочих режимів різання, як і раніше, залишається нормативно-довідковий. Кваліфікований технолог призначає режими обробки на підставі власного професійного досвіду. Однак подібний підхід стає неефективним з появою на виробництві нових, ще не апробованих матеріалів. При цьому строки, що відводяться на їхнє освоєння, вимагають автоматизації методів роботи технолога з розв'язання даних питань.

В основу створеної автоматизованої системи визначення оброблюваності конструкційних матеріалів покладений метод „вільного ” експерименту. Під терміном „вільний ” розуміють можливість довільного варіювання вхідними параметрами, що задаються експериментатором, тому експеримент можна вважати активним, а об'єкт дослідження – керованим. Використання такого методу дозволяє одержати максимум інформації про об'єкт і тим самим здійснити більш точне його моделювання. Об'єктом дослідження в даному випадку є процес механічної обробки конструкційного матеріалу (процес різання).

В якості вхідних параметрів в системі використано фізико-механічні характеристики оброблюваного та інструментального матеріалів, значення конструктивних параметрів інструмента, умови обробки тощо.

Вибір параметрів, що беруть участь в експерименті, залежить від конкретних вимог, що пред'являються до одержуваних моделей, та виду механічної обробки. Оптимальним варіантом було би використання всіх параметрів у комплексі. Однак такий підхід на практиці є недоцільним тому, що значно ускладнює обробку результатів, отримання математичних моделей параметрів процесу різання та подальший їх аналіз і використання.

Для проведення експериментальних досліджень процесу різання конструкційних матеріалів та обробки результатів експериментів і отримання необхідних математичних моделей пропонується використовувати автоматизований стенд, схема якого представлена на рис. 7.1.

Згідно з запропонованою методикою дослідження за допомогою автоматизованого стенда експерименти виконуються при довільних значеннях вхідних даних, тобто без використання наперед визначеного плану. Інформація про експеримент, який виконуються на технологічній системі 3, фіксується системою датчиків вимірювання параметрів різання 4. Блок комутації 5 послідовно підключає один з датчиків системи вимірювання параметрів різання 4 і отримана інформація поступає на вимірювальний блок 6.

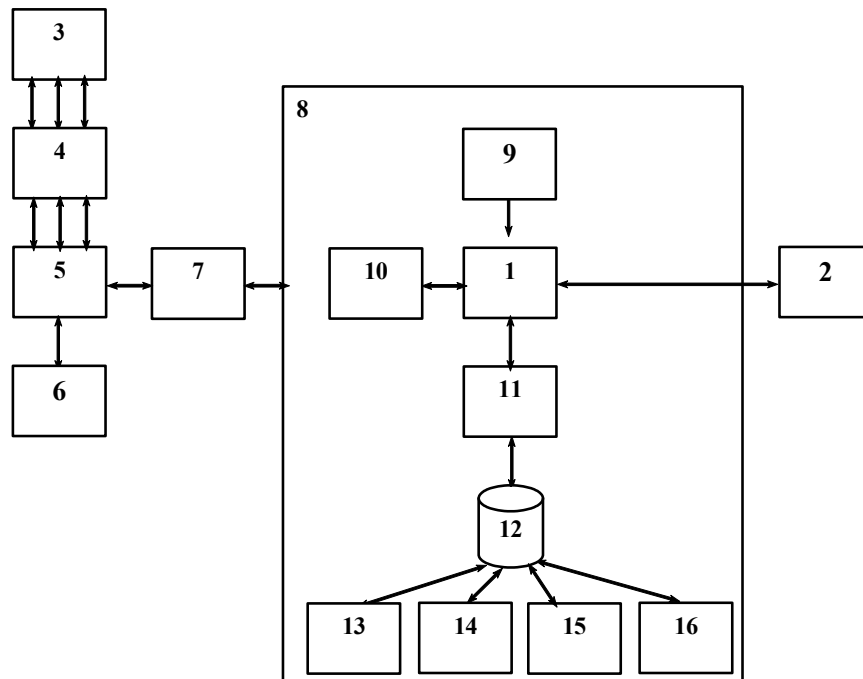


Рис. 7.1. Схема автоматизованого станда визначення оброблюваності матеріалів різання [7.14]:

- 1 – оперативний запам'ятовуючий пристрій ЕОМ;
- 2 – термінальний пристрій;
- 3 – технологічна оброблювальна система;
- 4 – система датчиків вимірювання параметрів процесу різання;
- 5 – блок комутації;
- 6 – вимірювальний блок;
- 7 – інтерфейсний блок;
- 8 – програмно-технічний комплекс;
- 9 – операційна система;
- 10 – прикладне програмне забезпечення;
- 11 – система керування базою знань;
- 12 – база знань;
- 13 – файл інструментальних матеріалів;
- 14 – файл оброблюваних матеріалів;
- 15 – файл математичних моделей;
- 16 – файл нормативно-довідкової інформації.

Одночасно через інтерфейсний блок 7 інформація поступає на програмно-технічний комплекс 8, до якого входять ЕОМ, операційна система 9, прикладне програмне забезпечення 10, система керування базою знань 11, база знань 12, файл інструментальних матеріалів 13, файл оброблюваних матеріалів 14, файл математичних моделей 15, файл нормативно-довідкової інформації 16. Використовуючи прикладне програмне забезпечення 10, отримуємо аналітичні залежності, які зв'язують вихідні параметри процесу різання з режимами і характеристиками оброблюваних та інструментальних матеріалів. Отримані аналітичні залежності заносяться в базу знань 12.

Розроблена система на даному етапі її реалізації охоплює чотири основних види обробки:

- токарна обробка (точіння);
- фрезерна обробка (фрезерування);
- свердління (розсвердлювання);
- розгортання.

Вибір виду математичної моделі. Математичні моделі параметрів та вихідних показників процесу різання можна представити залежністю

$$M_l = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m), \quad (7.1)$$

де $\Pi_i, i=1,2,\dots,m$, – параметри процесу різання, що мають найбільший вплив на вихідну величину $M_l, l=1,2,\dots,n$.

Враховуючи те, що необхідно одночасно отримати декілька математичних моделей вихідних показників процесу різання, та враховуючи подальше зберігання цих моделей в базі знань, доцільно представляти моделі в уніфікованому вигляді, як

$$M_e = C_e \Pi_1^\alpha \Pi_2^\beta \dots \Pi_m^\delta, \quad (7.2)$$

де $C_e, \alpha, \beta, \dots, \delta$ – коефіцієнти та показники степенів математичних моделей, значення яких залежать від оброблюваного та інструментального матеріалів, а також конкретних умов процесу різання.

Такий вигляд математичних моделей значно спрощує алгоритми та програми їх отримання, а також представляє задачу обробки експериментальних даних з метою отримання математичних моделей як задачу ідентифікації.

Загальний вигляд отримуваних математичних моделей для окремих видів обробки представлено наступним чином:

а) токарна обробка:

- складові сили різання

$$\begin{aligned} P_x &= C^{x1} V^{x2} S^{x3} t^{x4} \tau^{x5}; \\ P_y &= C^{y1} V^{y2} S^{y3} t^{y4} H B^{y5} \tau^{y6}; \\ P_z &= C^{z1} V^{z2} S^{z3} t^{z4} \tau^{z5}; \end{aligned}$$

- розмірний знос різального інструменту

$$h = C^{h1} V^{h2} S^{h3} t^{h4} \tau^{h5};$$

- шорсткість обробленої поверхні

$$R_a = C^{r1} V^{r2} S^{r3} H B^{r4} \delta^{r5} r^{r6};$$

- похибка обробки поверхні

$$\delta = C^{\delta1} V^{\delta2} S^{\delta3} \tau^{\delta4} P_z^{\delta5} h^{\delta6};$$

- швидкість зношення різального інструменту

$$J = C_o \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4};$$

б) свердління отворів:

– осьова сила різання

$$P_o = C^{o1} V^{o2} S^{o3} D^{o4} \tau^{o5};$$

– обертовий момент

$$M = C^{M1} V^{M2} S^{M3} D^{M4} \tau^{M5};$$

– розмірний знос різального інструменту

$$h = C^{h1} V^{h2} S^{h3} t^{h4} \tau^{h5};$$

– шорсткість обробленої поверхні отвору

$$R_a = C^{r1} V^{r2} S^{r3} HB^{r4} \delta^{r5} \varphi^{r6}$$

– похибка обробки отвору

$$\delta = C^{\delta1} V^{\delta2} S^{\delta3} \tau^{\delta4} P_z^{\delta5} h^{\delta6};$$

– швидкість зношення різальної крайки свердла

$$J = Co \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4};$$

в) фрезерування поверхонь:

– складові сили різання

$$P_x = C^{x1} V^{x2} S^{x3} D^{x4} \tau^{x5} N^{x6} b^{x7};$$

$$P_y = C^{y1} V^{y2} S^{y3} t^{y4} \tau^{y5} N^{y6} b^{y7};$$

$$P_z = C^{z1} V^{z2} S^{z3} t^{z4} \tau^{z5} N^{z6} b^{z7};$$

– розмірний знос фрези

$$h = C^{h1} V^{h2} S^{h3} t^{h4} \tau^{h5} N^{h6} b^{h7};$$

– шорсткість обробленої поверхні

$$R_a = C^{r1} V^{r2} S^{r3} HB^{r4} \delta^{r5} r^{r6} N^{r7};$$

– похибка фрезерування поверхні

$$\delta = C^{\delta1} V^{\delta2} S^{\delta3} \tau^{\delta4} P_z^{\delta5} h^{\delta6} N^{\delta7};$$

– швидкість зношення фрези

$$J = Co \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4};$$

г) розгортання отворів:

– осьова сила різання

$$P_o = C^{o1} V^{o2} S^{o3} D^{o4} \tau^{o5};$$

– обертовий момент

$$M = C^{M1} V^{M2} S^{M3} D^{M4} \tau^{M5};$$

– розмірний знос різального інструменту

$$h = C^{h1} V^{h2} S^{h3} t^{h4} \tau^{h5};$$

– шорсткість обробленої поверхні отвору

$$R_a = C^{r1} V^{r2} S^{r3} HB^{r4} \delta^{r5} \varphi^{r6}$$

– похибка обробки отвору

$$\delta = C^{\delta1} V^{\delta2} S^{\delta3} \tau^{\delta4} P_z^{\delta5} h^{\delta6};$$

– швидкість зношення розгортки

$$J = Co \cdot V^{a1} \cdot s^{a2} \cdot t^{a3} \cdot \tau^{a4}.$$

В наведених формулах використано такі умовні позначення:

V – швидкість різання, м/хв;

s – подача різання, мм/хв;

t – глибина різання, мм;
 τ – час різання, хв;
 HB – твердість оброблюваного матеріалу за Бринелем;
 r – радіус при вершині різця, мм;
 D – діаметр отвору або фрези, мм;
 φ – головний кут різця в плані в градусах;
 b – ширина фрезерування, мм;
 N – кількість зубів фрези.

В ході експерименту через визначені інтервали часу (не обов'язково однакові) реєструвались необхідні параметри процесу різання, що заносились в відповідні масиви. Наведені вище математичні моделі визначались в результаті обробки отриманих масивів інформації.

Методика отримання математичних моделей. Аналіз методів ідентифікації математичних моделей показав, що для їх отримання доцільно використовувати метод групового врахування аргументів або метод найменших квадратів, опис яких наведено в розділі 4 (підрозділи 4.6 та 4.3 відповідно). Перевагою методу найменших квадратів (МНК) є те, що він не залежить від кількості виконаних дослідів та мінімізує суму квадратів відхилень дійсних результатів та тих, які обчислені за допомогою отриманої апроксимуючої функції. В той же час МГВА дозволяє отримати математичні моделі оптимальної складності. Порівняльний аналіз цих методів показав, що в нашому випадку, для розв'язання задачі ідентифікації використання МНК є більш доцільним тому, що наперед визначено вид моделі, яка отримується.

7.2 Методика визначення оброблюваності матеріалів різанням

При розв'язанні задачі визначення оброблюваності матеріалів різанням введено поняття відносної та реальної оброблюваності. Тому в даному підрозділі розглянуто ці два види оброблюваності та їх взаємозв'язок.

Як уже відмічалось раніше, відносна оброблюваність знаходить менше застосування на виробництві, ніж абсолютна, через її трудомісткість та низьку інформативну цінність. При цьому, одержавши значення відносного коефіцієнта оброблюваності, можна лише визначити більшу або меншу придатність до обробки того чи іншого матеріалу, але не отримати інформації про те, в яких умовах та з якими режимами різання його необхідно обробляти.

Запропонована методика дозволяє змінити відношення до процесу визначення відносної оброблюваності. З її використанням відпадає необхідність у проведенні контрольних експериментів над досліджуванним матеріалом. Достатньо тільки мати відповідні математичні моделі параметрів обробки матеріалу, методика одержання яких було описана в попередньому підрозділі та в [7.12, 7.13, 7.15, 7.17]. Усі необхідні обчислення, що раніше потребували значної кількості часу, можна виконувати автономно, в автоматизованому режимі. При цьому є можливість співставити еталонний і досліджуваний матеріали по кожному з параметрів, що визначаються, а також,

що особливо важливо, вирахувати комплексний показник оброблюваності. Відповідно цієї методики технологу-досліднику потрібно тільки вказати значення вагових коефіцієнтів для відповідних параметрів згідно з експертними оцінками, тим самим об'єктивно визначивши їхню пріоритетність. У результаті цього, вже на перших етапах освоєння нових матеріалів, що раніше не застосовувалися на виробництві, можна встановити раціональні або оптимальні умови їх обробки та можливі області їх подальшого використання [7.18].

Під відносною оброблюваністю матеріалу розуміють коефіцієнт, що дорівнює відношенню значень параметра, по якому ведеться порівняння, обчислених за однакових умов різання досліджуваного й еталонного матеріалів. Таким чином:

$$K_i = \frac{P_{i\text{досл}}}{P_{i\text{ет}}}, \quad (7.3)$$

де K_i – коефіцієнт відносної оброблюваності;

$P_{i\text{досл}}$ і $P_{i\text{ет}}$ – значення параметрів за заданих умов різання досліджуваного та еталонного матеріалів.

Коефіцієнти оброблюваності можуть бути представлені як у відсотковому відношенні, так і в абсолютній величині. При цьому K_i є додатною величиною, яка враховує властивості оцінюваних параметрів P_i .

Значення коефіцієнтів K_i визначали за умови:

$$\begin{cases} K_i \in (0..1] \text{ при } P_{i\text{досл}} \leq P_{i\text{ет}}; \\ K_i \in (1..\infty) \text{ при } P_{i\text{досл}} > P_{i\text{ет}}. \end{cases}$$

Якщо $K_i < 1$, то за параметром P_i досліджуваний матеріал перевершує еталонний, тобто має кращу оброблюваність за даним показником, ніж еталонний. Протилежне – свідчить про те, що технологічна оброблюваність досліджуваного матеріалу за відповідним параметром гірша еталонного матеріалу.

Якщо порівняння матеріалів ведеться за одним конкретним параметром, то коефіцієнт K_i ще прийнято називати частковим коефіцієнтом оброблюваності.

В якості параметрів P_j , за якими проводиться оцінка матеріалів, можна використовувати:

- величини сил різання, що виникають у процесі обробки (P_x , P_y , P_z , P_o) або обертовий момент ($M_{об.}$);
- величину зносу (швидкість зношування) різального інструменту по задній поверхні H_3 (J_3);
- шорсткість обробленої поверхні (R_a або R_z);
- похибку обробки (δ) тощо.

Тоді часткові коефіцієнти оброблюваності за відповідними параметрами будуть визначатися як:

$$K_{H_3} = \frac{H_{3\text{досл}}}{H_{3\text{ет}}}, \quad K_{I_3} = \frac{I_{3\text{досл}}}{I_{3\text{ет}}}, \dots, \quad K_{\delta} = \frac{\delta_{\text{досл}}}{\delta_{\text{ет}}}.$$

На практиці часто виникає необхідність оцінки матеріалу, особливо нового, не за одним, а за декількома параметрами одночасно. Для цього використано поняття комплексного коефіцієнта оброблюваності, що визначається згідно з формулою:

$$K_k = \frac{\sum_{i=1}^n k_{bi} \cdot K_i}{\sum_{i=1}^n k_{bi}} = \frac{k_{b1} \cdot K_1 + k_{b2} \cdot K_2 + \dots + k_{bn} \cdot K_n}{k_{b1} + k_{b2} + \dots + k_{bn}}; \quad (7.4)$$

де K_k – комплексний коефіцієнт оброблюваності;

k_{bi} – вагові коефіцієнти;

n – кількість часткових коефіцієнтів оброблюваності, що використовуються при визначенні комплексного показника.

Як видно з виразу (7.4), K_k складається з ряду часткових коефіцієнтів оброблюваності, яким ставляться у відповідність вагові коефіцієнти k_{bi} . Роль k_{bi} зводиться до розподілу пріоритетності (важливості) між частковими показниками оброблюваності K_i для конкретних умов виробництва.

Так, при обробці малогабаритних вартісних заготовок на перше місце виходять похибка обробки, стан поверхневого шару та припустимі зусилля різання. Обробка великих заготовок вимагає пріоритету стійкості інструмента та швидкості його зношення. Тому слід відзначити, що важливість того чи іншого параметра не носить суворого рекомендаційного характеру, а визначається за рядом пріоритетності, який побудовано в результаті опитування експертів, виходячи з їх особистого досвіду і знання виробничого процесу. Тому вагові коефіцієнти можуть мати ще й іншу назву – експертні оцінки. Використання ряду пріоритетності дозволяє звести до мінімуму похибку визначення відносної оброблюваності, усунути похибки попередніх дослідних вимірів і суб'єктивізм їхньої оцінки. У виняткових випадках, технолог-дослідник має можливість сам визначити значення вагових коефіцієнтів, однак він повинен заздалегідь взяти до уваги можливість одержання результатів з визначеною похибкою.

Таким чином, у запропоновану методику було закладено обидва етапи визначення відносної оброблюваності матеріалів для пари „досліджуваний матеріал – матеріал-еталон”, а саме:

- визначення часткових коефіцієнтів оброблюваності;
- обчислення комплексного коефіцієнта оброблюваності.

Характер автоматизації обчислювальних процесів і можливість вибору матеріалу - еталона роблять такий підхід більш доступним для дослідника.

Реальна оброблюваність передбачає одержання для різних видів обробки

відповідних математичних моделей, тобто залежностей вихідних параметрів від вхідних, з наступним розв'язанням оптимізаційної задачі за обраними критеріями. Ці залежності отримують для кожного з матеріалів окремо або для груп подібних матеріалів. Часто для одного матеріалу ставлять у відповідність кілька таких залежностей, при цьому розбиваючи множину значень вхідних параметрів на складові його підмножини. Це пов'язано з підвищеною чутливістю процесів, що моделюються, до незначних змін зовнішніх впливів.

Як визначено в підрозділі 7.1, вид залежностей вихідних параметрів від вхідних $P_i=f(P_j)$ у даній методиці для різних видів обробки встановлюється розробником і не змінюється впродовж всієї роботи з нею. Тому ці ж залежності також будуть використовуватися для визначення реальної оброблюваності.

Вибір критерію оптимальності при розв'язанні задачі встановлення реальної оброблюваності матеріалів різанням визначається, виходячи із реальних вимог виробництва. В якості таких критеріїв можна вибрати:

- а) критерій абсолютного відхилення;
- б) час обробки (час різання);
- в) продуктивність процесу різання;
- г) собівартість виготовлення деталі для даного виду обробки;
- д) стійкість різального інструменту тощо.

Ці критерії поєднують у собі основні техніко-економічні вимоги до виробничого процесу, а саме одержання якісної продукції (виробів, деталей) в найкоротший термін з мінімальними витратами матеріальних і виробничих ресурсів.

Універсальної методики розв'язання такої визначеної й в той же час достатньо складної оптимізаційної задачі поки не знайдено. Запропонована методика це – один з варіантів її рішення. Технологу пропонується визначити найбільш важливий для конкретних умов критерій оптимальності і по ньому виконати обчислення реальної оброблюваності досліджуваного матеріалу.

Незважаючи на складний і тісний взаємозв'язок, що спостерігається між вихідними параметрами P_j , методи багатокритеріальної оптимізації дозволяють застосувати для дослідження процесу різання деякий узагальнений, комплексний критерій оптимізації. Опис методики формування комплексного критерію оптимальності та алгоритмів розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації наведено в розділі 5.

Паралельно з проблемою вибору критерію розв'язано не менш важливу задачу вибору методу оптимізації – методу визначення найбільшого (найменшого) значення цільової функції.

Аналіз критеріїв реальної оброблюваності (критеріїв оптимізації).

Критерій абсолютного відхилення, як і інші критерії, передбачає визначення таких значень вихідних параметрів P_j , при яких спеціальна цільова функція досягає свого найменшого (найбільшого) значення. Цільова функція для критерію абсолютного відхилення має такий вигляд:

$$Fo = \frac{\sum_{j=1}^m \left| \left(\frac{P\partial_j}{2} - P_j \right) \cdot k_j \right|}{\sqrt{\prod_{j=1}^m \left| \left(\frac{P\partial_j}{2} - P_j \right)^2 k_j \right|}} \rightarrow \min, \quad (7.5)$$

де m – кількість вихідних параметрів P_j ;
 $P\partial_j$ – припустиме значення P_j -го параметра;
 k_j – вагові коефіцієнти.

Вираз (7.5) математично описує вимоги мінімізації абсолютного відхилення розрахункового значення від половинної величини припустимого по кожному з обраних часткових параметрів оптимізації. Тобто реалізовано визначення найменшого значення цільової функції F_o на основі вагової рівності параметрів. Значення вагових коефіцієнтів k_j обчислювали згідно формули:

$$k_j = \prod_{i=1}^{m-1} P\partial_i, (i \neq j). \quad (7.6)$$

При цьому на значення параметрів, що обчислюються, накладено обмеження, які визначали на основі технологічних вимог до якості й точності одержуваної в результаті обробки поверхні, а також за ступенем зносу інструмента в процесі різання.

Вказані обмеження формували область допустимих рішень D_1 :

$$D_1 : \begin{cases} N = f(Pz, V) \leq N\partial; \\ H_3 = f(V, s, t, \tau) \leq H_3\partial; \\ Ra = f(V, s, t, \tau, r, HB, \sigma_B, \varepsilon) \leq Ra\partial; \\ \delta = f(V, s, t, \tau, Pz, I) \leq \delta\partial; \end{cases} \quad (7.7)$$

де N – потужність різання, кВт;
 H_3 – величина зносу інструмента по задній поверхні, мм;
 Ra – шорсткість поверхні після обробки, мкм;
 δ – похибка обробки, мм.

Окрім того, додаткові границі області допустимих рішень D_2 утворено наступними обмеженнями:

$$D_2 : \{n_{\min} \leq n \leq n_{\max}; \quad s_{\min} \leq s \leq s_{\max}; \quad t_{\min} \leq t \leq z\}, \quad (7.8)$$

де n_{\min} , n_{\max} , s_{\min} , s_{\max} , t_{\min} – максимальні та мінімальні значення частоти обертання шпинделя (інструмента) n , подачі s і глибини різання t відповідно;
 z – величина припуску під обробку.

Результуюча область пошуку найменшого значення цільової функції визначена перетином областей D_1 і D_2 , тобто $D = D_1 \cap D_2$.

Таким чином, розглянутий критерій дозволяє визначати оптимальні значення для загального випадку оптимізації, тобто тоді, коли немає чітко вираженого пріоритету одного з вихідних параметрів.

Як приклад, наведемо вигляд цільової функції F_o при оптимізації за критерієм абсолютного відхилення для процесу токарної обробки:

$$F_o = \frac{\left| \frac{N\partial}{2} - N \right| \cdot k_N + \left| \frac{H_3\partial}{2} - H_3 \right| \cdot k_H + \left| \frac{Ra\partial}{2} - Ra \right| \cdot k_{Ra} + \left| \frac{\delta\partial}{2} - \delta \right| \cdot k_\delta}{\sqrt{\left| \frac{N\partial}{2} - N \right|^2 \cdot k_N + \left| \frac{H_3\partial}{2} - H_3 \right|^2 \cdot k_H + \left| \frac{Ra\partial}{2} - Ra \right|^2 \cdot k_{Ra} + \left| \frac{\delta\partial}{2} - \delta \right|^2 \cdot k_\delta}} \rightarrow \min.$$

Критерій часу обробки використовується в системі з метою визначення таких режимів процесу різання, при яких на обробку наданої поверхні витрачається найменша кількість часу за умови збереження інших вихідних параметрів у встановлених межах. Цей критерій досить часто превалює в серійному і масовому виробництві, де діє налагоджена схема технологічного процесу, а одержувані вироби не відносяться до категорії високоточних. Тому в припустимих межах можна „зневажити” іншими параметрами, висунувши на передній план питання скорочення часу обробки. Термін „зневажити” в даному випадку говорить не про їхнє погіршення, а лише вказує на можливість зміни в заданих границях, що дозволяє розширити область оптимізації і, отже, знайти відповідне оптимальне рішення. З врахуванням цього, загальний вигляд цільової функції буде:

$$F_o = f(V, s, t) \rightarrow \min \quad (7.9)$$

Для визначення виду аналітичної залежності (цільової функції) $\tau = f(V, s, t)$, в якості прикладу розглянемо процес токарної обробки циліндричної заготовки. Тоді вираз для визначення часу обробки може бути записано як:

$$\tau = \frac{L}{n \cdot s}, \quad (7.10)$$

де L – довжина оброблюваної поверхні, мм;

n – частота обертання шпинделя верстата, об/хв;

s – подовжня подача різця, мм/хв.

Якщо припуск z , що відводиться під обробку, знімається за кілька проходів, то відповідно збільшується і час обробки τ . З врахуванням цього та залежності швидкості різання від частоти обертання шпинделя верстата, вираз для визначення часу, що витрачається на токарну обробку, остаточно буде мати такий вигляд:

$$\tau = \frac{L \cdot z \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot V \cdot n \cdot t \cdot s}. \quad (7.11)$$

Отримана залежність $\tau = f(V, s, t)$ може бути застосована не тільки для токарної, але і для інших видів обробки. Обмеження, що накладаються на область пошуку, як і при використанні попереднього критерію визначали розмірами області D , яка задана обмеженнями (7.7) та (7.8).

Продуктивність процесу обробки деталей на металорізальних верстатах є величиною, що зворотна часу обробки поверхонь. Тому в даному випадку використовують формули, які аналогічні попередньому критерію оптимізації. При розв'язанні задачі оптимізації визначаються режими різання, які доставляють максимальне значення продуктивності праці в області, що представлені обмеженнями (7.7) та (7.9).

Практично будь-яке приладобудівне та машинобудівне виробництво стикається з проблемою продовження терміну служби застосовуваних інструментів. Одним з варіантів її розв'язання є проектування нових інструментів з поліпшеними конструкторсько-технологічними характеристиками. Однак цей варіант вимагає для своєї реалізації значних витрат матеріальних і часових ресурсів. Тому пропонується йти іншим шляхом – продовжити термін служби уже наявного інструмента за рахунок раціональних умов його використання. В запропонованій методиці такий підхід знайшов своє відображення при визначенні абсолютної оброблюваності у вигляді критерію стійкості різального інструменту.

Необхідність відмови від подальшого використання різального інструменту та наступного його переточування визначається величиною гранично допустимого зношення $H_{зд}$, що у всіх випадках приймається як найбільша ширина (мм) зношеної контактної площадки на задній поверхні інструмента. При цьому варто розрізняти поняття гранично допустимого і припустимого зношення. Припустиме зношення визначає границі області оптимізації D і тільки в окремих випадках може бути дорівнювати гранично допустимому

$$(H_{зд} \leq H_{зд}).$$

Вираз, що визначає цільову функцію F_o для критерію стійкості різального інструмента має такий вигляд:

$$F_o = T = \frac{H_{зд}}{J} \rightarrow \max, \quad (7.12)$$

де J – інтенсивність зношення різального інструменту, мм/хв;

$H_{зд}$ – величина гранично допустимого зносу, мм.

В результаті розв'язання задачі оптимізації за критерієм (7.12), на відміну від раніш наведених критеріїв, одержимо не тільки значення параметрів різання, що забезпечують якісну роботу інструмента до досягнення гранично допустимого зношення, але й основну його характеристику – стійкість, що представлена в хвилинах. Це дозволить заздалегідь спланувати виробничий цикл, рівномірно завантажити інструментальні служби і, найголовніше, продовжити термін служби різального інструмента без конструкторсько-

технологічних доробок. Тут областю пошуку оптимального рішення залишається область D .

Наступним критерієм, задіяним при розв'язанні задачі визначення абсолютної оброблюваності, є критерій собівартості продукції, що виготовляється. Він найбільш повно охоплює весь виробничий процес і дозволяє підійти до оцінки оброблюваності з техніко-економічної точки зору, тому що в основу організації будь-якого виробництва покладено принцип одержання вигоди.

Технологічна собівартість C (грн/шт), що виступає в даному випадку як цільова функція F_o , що визначається таким виразом:

$$F_o = C = \epsilon_n + \tau \cdot (a_T + \frac{M(K_i)}{T}) \rightarrow \min; \quad (7.13)$$

$$\epsilon_n = t_\epsilon \cdot (a_{cn1} + a_p) + \frac{T_{n.з.}}{Q} \cdot \epsilon_{cm}; \quad \epsilon_{cm} = a_{cn1} + a_p + a_n;$$

$$\tau = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{10^3 \cdot V \cdot s} \cdot i; \quad a_T = a_{cm} + a_p,$$

де t_ϵ — час допоміжних переміщень при обробці однієї деталі, хв;

a_{cn1} — витрати, що пов'язані з простоєм верстата, грн/хв;

a_p — хвилинна заробітна плата робітника (з нарахуваннями), грн/хв;

$T_{n.з.}$ — підготовчо-заклучний час, хв;

Q — кількість деталей, яку необхідно виготовити за заданий проміжок часу (розмір партії);

a_n — хвилинна заробітна плата наладчика (з нарахуваннями), грн/хв;

a_{cm} — вартість верстато-хвилини основного часу верстата з врахуванням накладних витрат, грн/хв;

d — діаметр оброблюваної поверхні (діаметр інструмента), мм;

l — довжина оброблюваної поверхні, мм;

V — швидкість різання, м/хв;

s — подача, мм/хв;

i — кількість проходів при обробці поверхні деталі, що визначається виразом:

$$i = \begin{cases} K_1 \text{ якщо } (z - K_1 \cdot t) < t\partial; \\ K_1 + 1 \text{ інакше.} \end{cases}, \quad K_1 = \frac{z}{t}; \quad (7.14)$$

z — величина припуску під обробку, мм;

t — глибина різання, мм;

t_∂ — мінімально припустима глибина різання, мм;

$M(K_i)$ — математичне очікування питомої вартості інструмента, грн/хв;

Математичне очікування питомої вартості інструмента визначаємо за формулою:

$$M(K_i) = \{t_{cn} \cdot b_{cm} \cdot [m_1 + M(m_2)] + a_s \cdot t_n \cdot m_1 + B \cdot [1 + M(m_2)]\} \cdot m_1^{-1}; \quad (7.15)$$

$$t_{cn} = t_{cm} + \frac{h_{np}}{\delta - \Delta} \cdot t_{nn}; \quad h_{np} = h \cdot \operatorname{tg} \alpha + \Delta T_i;$$

$$M(m_2) \cong \frac{m_1 \cdot T}{t_{paz} \cdot \rho}; \quad t_{paz} = \int_0^{\infty} \rho(t_{paz}) dt;$$

де m_1 – кількість змін інструмента через його зношення або припустима кількість переточувань;

$M(m_2)$ – математичне очікування кількості змін інструмента через його поломку або викришування;

a_3 – вартість верстато-хвилини основного часу заточувального верстата з врахуванням накладних витрат, грн/хв;

t_n – час, затрачуваний на переточування інструмента, хв;

t_{cm} – час зміни інструмента, хв;

h_{np} – гранична величина розмірного зносу інструмента, мм;

δ – допуск на одержуваний точнісний параметр, мм;

Δ – сумарна похибка обробки, мм;

t_{nn} – час на розмірне налаштування і підлаштування технологічної системи, хв;

h – величина зношення різального інструмента по задній поверхні, мм;

α – задній кут різального інструмента в градусах;

ΔT_i – похибка, що викликана температурною деформацією інструмента, мм;

T – період стійкості різального інструмента, хв;

t_{paz} – середній час безвідмовної роботи (наробіток на відмовлення) інструмента, хв;

$p(t_{paz})$ – ймовірність руйнування різального інструмента.

Для розв'язання задачі оптимізації необхідно вказати значення економічних показників, які відносяться до умовно постійної інформації нормативно-довідкового характеру і визначаються на основі сформованої на поточний момент економічної ситуації у виробничій сфері. Методика визначення реальної оброблюваності конструкційного матеріалу за критерієм технологічної собівартості обробки дозволяє в інтерактивному режимі робити редагування економічних показників для відповідного виду механічної обробки.

В результаті оптимізації за критерієм собівартості одержуємо значення режимів різання (V, s, t, τ) , що відповідають мінімуму цільової функції F_o , а також власне собівартість відповідного процесу обробки, представлену в гривнях.

Таким чином, запропонована методика дозволяє не тільки визначити реальну оброблюваність в її класичному розумінні, але й одержати додаткову інформацію про процес різання.

7.3 Алгоритм визначення оброблюваності матеріалів різанням

Для визначення оброблюваності матеріалів різанням на основі моделювання технологічних параметрів та розробленої методики створено алгоритм її реалізації, узагальнену схему якого наведено на рис. 7.2.

Відповідно до представленого алгоритму насамперед виконується відкриття бази даних конструкційних матеріалів та бази знань, що містить математичні моделі параметрів для відповідної пари „конструкційний – оброблюваний матеріал” згідно з вибраним методом обробки різанням. На наступному кроці здійснюється введення найменування досліджуваного матеріалу та читання з бази знань математичних моделей його параметрів. В випадку розв’язання задачі визначення відносної оброблюваності конструкційного матеріалу по запиту системи вводиться найменування матеріалу – еталону, з яким буде здійснюватись порівняння вихідних параметрів досліджуваного матеріалу. За назвою матеріалу - еталону із бази знань вибираються відповідні матеріалу математичні моделі вихідних параметрів процесу різання. Для визначення відносних показників оброблюваності в діалоговому режимі вводяться умови обробки, а саме: розміри оброблюваної поверхні, параметри різального інструменту, режими різання тощо. На основі вибраних математичних моделей досліджуваного та еталонного матеріалів та введених умов обробки визначаються часткові показники, згідно формул (7.1) та (7.2). Значення обрахованих показників виводяться на екран монітора.

З метою визначення комплексного показника оброблюваності матеріалу за сукупністю часткових показників, згідно формули (7.4), в діалоговому режимі вводяться вагові коефіцієнти (експертні оцінки) кожного часткового показника, які встановлюються в результаті опитування експертів. Значення комплексного показника відносної оброблюваності досліджуваного конструкційного матеріалу виводяться на друк. На цьому робота алгоритму з визначення відносної оброблюваності матеріалу різанням закінчує свою роботу.

При розв’язанні задачі визначення реальної оброблюваності матеріалу різанням, що полягає в оптимізації умов обробки конструкційного матеріалу (частіше всього визначення оптимальних режимів різання), в діалоговому режимі вводяться критерій оптимальності, умови обробки та параметри оброблюваної поверхні.

Область допустимих рішень формується шляхом завдання необхідних параметрів якості оброблюваної поверхні, граничних значень частоти обертання шпинделя верстата та подачі, періоду стійкості різального інструменту тощо. На основі математичних моделей окремих параметрів процесу різання для використовуваних оброблюваного та інструментального матеріалів формується загальна математична модель процесу різання. Ця модель включає вираз цільової функції та функцій обмежень, які створюють

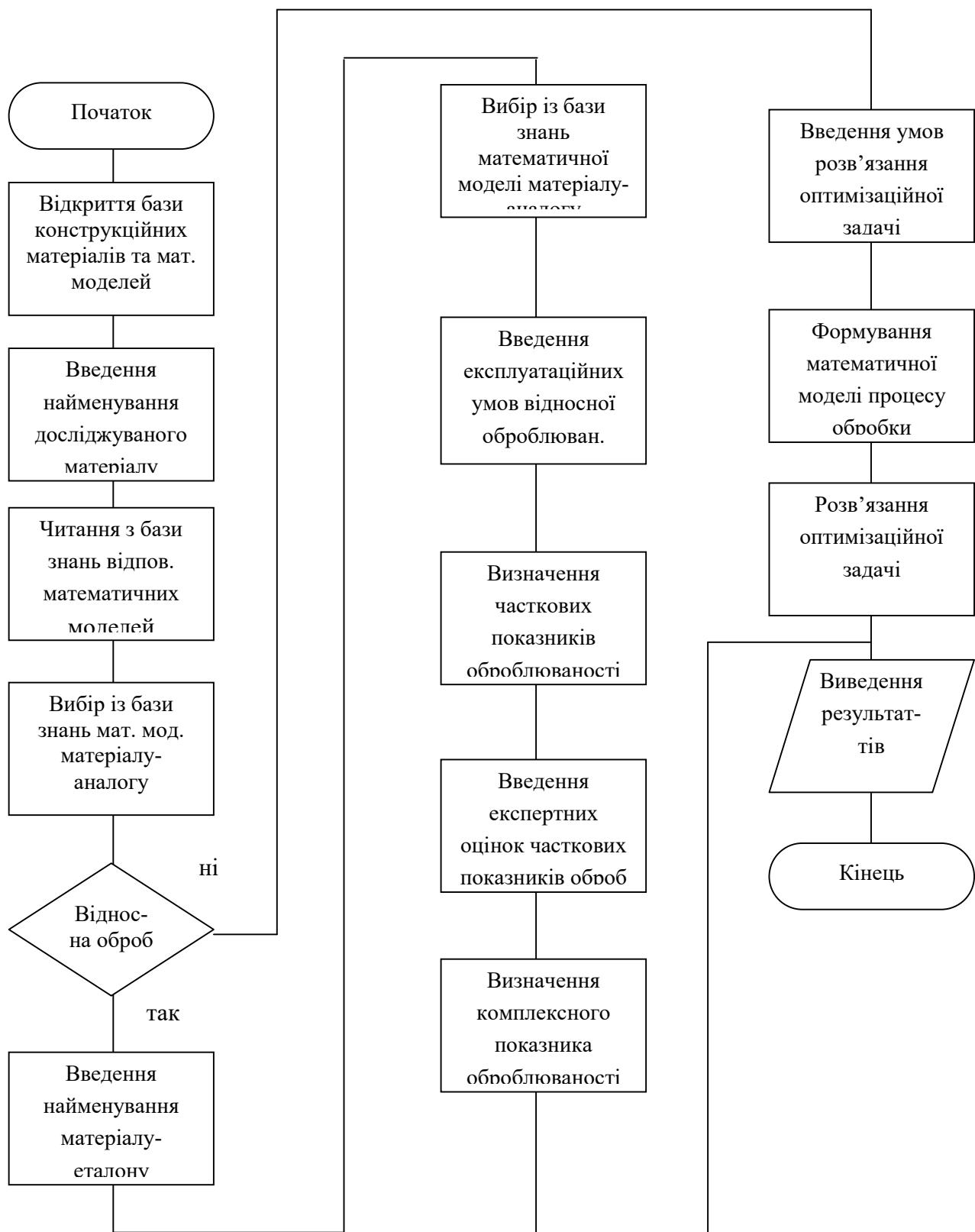


Рис 7.2. Узагальнена схема алгоритму визначення оброблюваності матеріалів різанням.

область допустимих рішень. Розв'язання оптимізаційної задачі здійснюється одним із методів багатовимірного нелінійного програмування, опис яких наведено в розділі 5. Оптимальні умови обробки конструкційного матеріалу

(режими різання) виводяться на друк. На цьому визначення реальної оброблюваності досліджуваного конструкційного матеріалу, згідно з запропонованим алгоритмом, закінчується.

7.4 Автоматизована система отримання математичних моделей та визначення оброблюваності матеріалів різанням

З метою автоматизації отримання математичних моделей вихідних параметрів обробки матеріалів різанням та визначення оброблюваності конструкційних матеріалів різанням як відносної, так і реальної розроблена система, алгоритми якої наведено на рис. 7.3. Програмна реалізація запропонованого алгоритму роботи автоматизованої системи отримання математичних моделей вихідних показників процесу різання, визначення відносної оброблюваності матеріалів та оптимізації режимів різання виконана у вигляді автоматизованої системи на алгоритмічній мові Delphi [7.12 –7.14, 7.17].

Послідовність дій зі створення математичних моделей, визначення відносної оброблюваності конструкційних матеріалів та оптимізації процесу різання (визначення реальної оброблюваності) покажемо за допомогою відповідних екранних форм автоматизованої системи.

На початковому етапі роботи системи здійснюється вибір виду обробки. Це виконується за допомогою перемикача екранної форми, що наведена на рис. 7.4. Далі вводяться результати експериментальних досліджень, а саме назви оброблюваного та інструментального матеріалів, їх параметри, умови проведення експериментів, а також значення вимірів вихідних показників по кожному із дослідів (рис. 7.5). Після введення вказаної інформації здійснюється розрахунок коефіцієнтів вихідних показників процесу різання та їх занесення в базу знань.

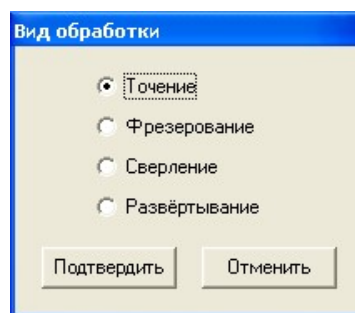


Рис. 7.4. Вікно вибору виду обробки.

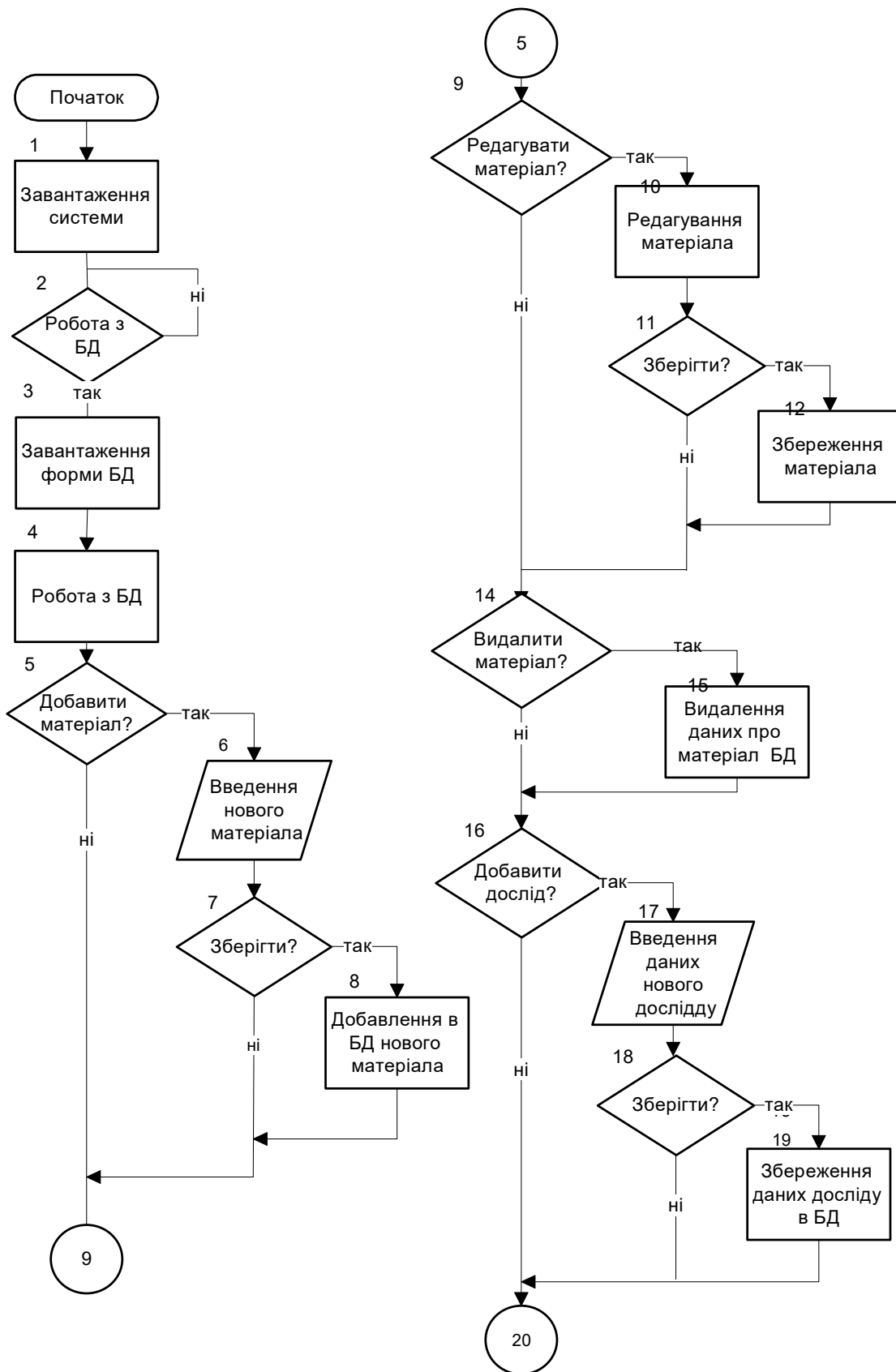
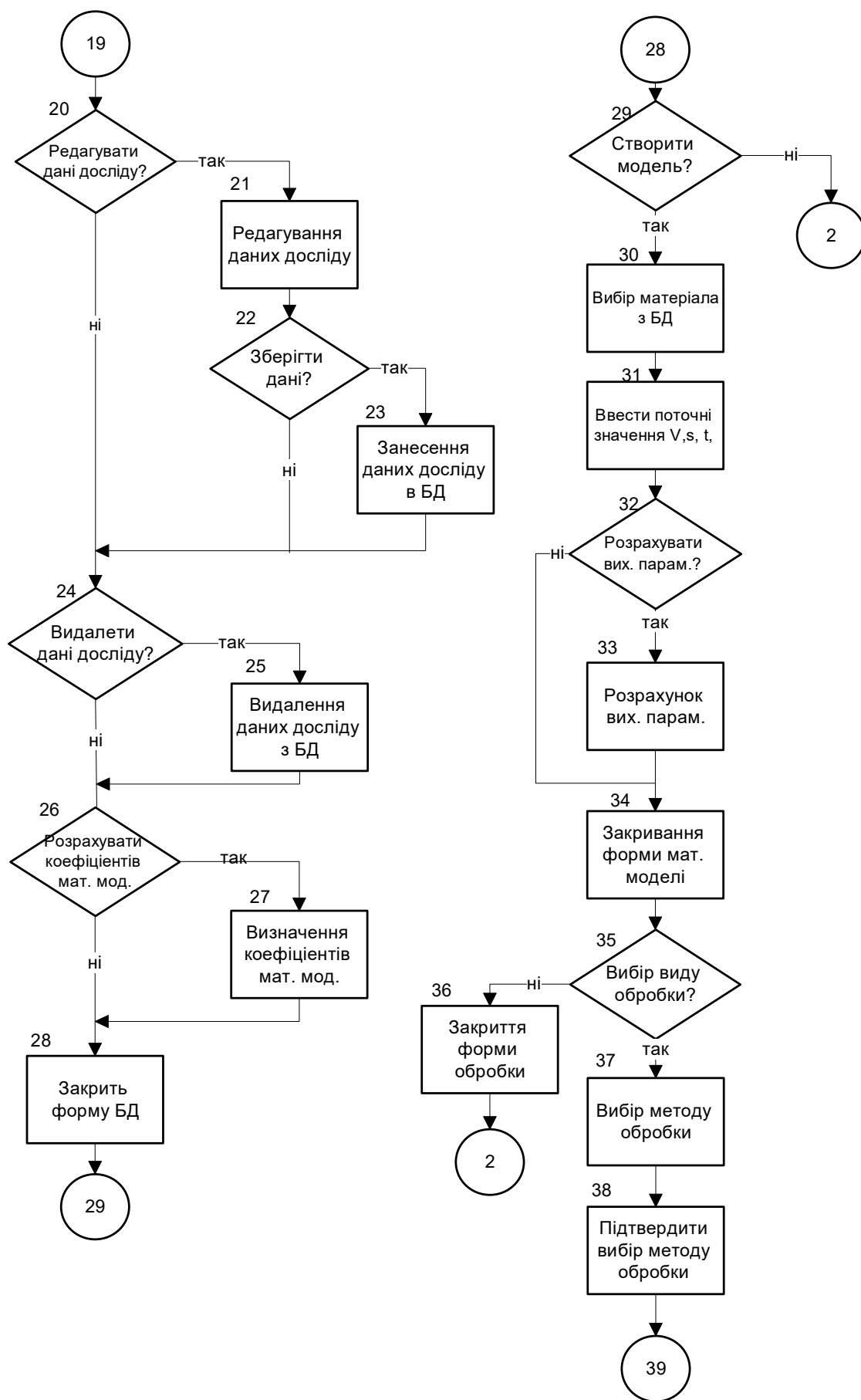
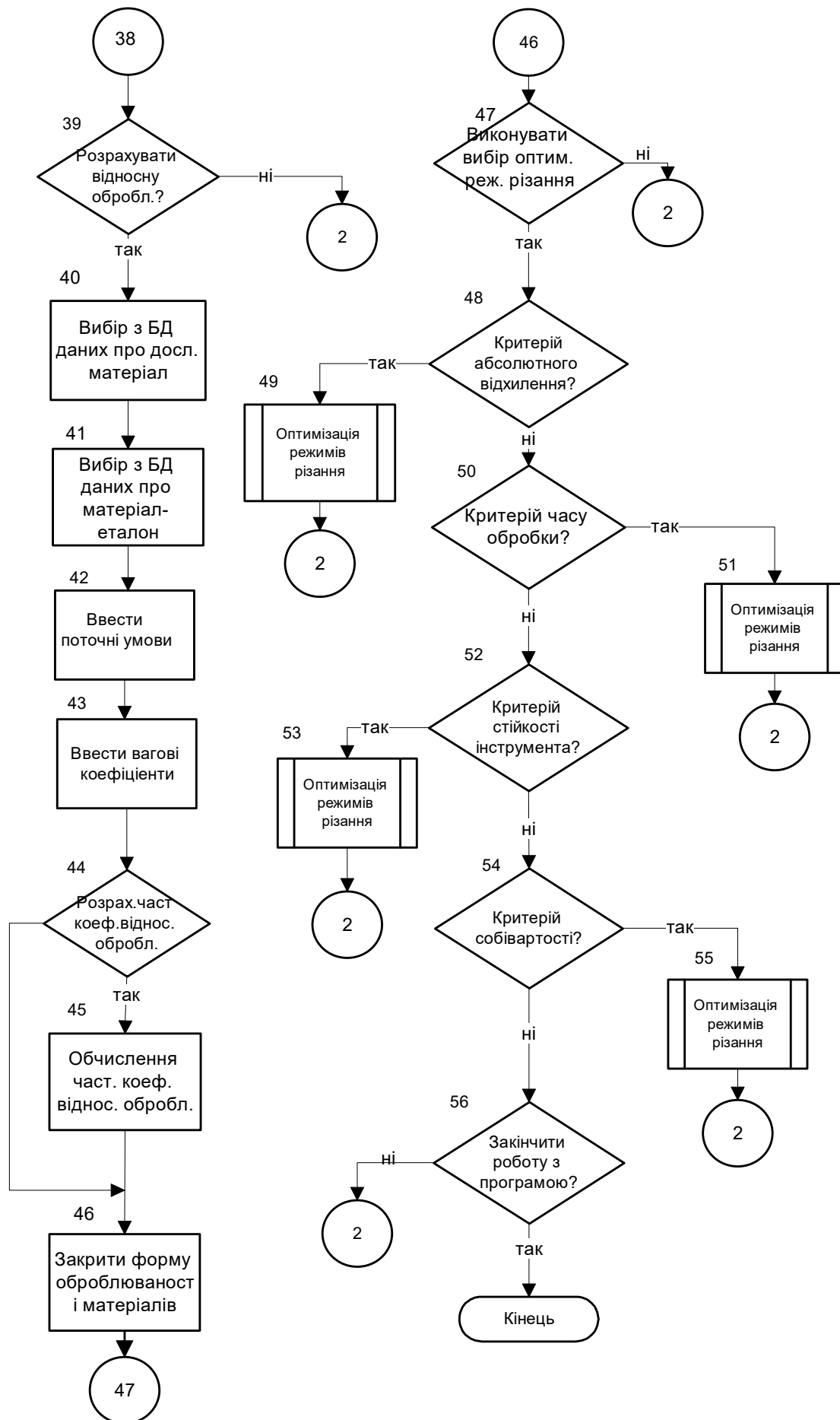


Рис. 7.3. Узагальнена схема роботи автоматизованої системи моделювання та визначення оброблюваності матеріалів різанням.



Продовження рис. 7.3.



Продовження рис. 7.3.

База данных материалов

Название:

Начальный износ резца H (мм): Радиус закругления при вершине резца r (мм):

Главный угол в плане φ (град): Вспомогательный угол в плане φ_1 (град):

Твёрдость обрабатываемого материала $HВ$ (МПа): Предел прочности материала σ_B (МПа):

Номер опыта: Всего опытов:

Диаметр D (мм): Скорость вращения n (об/мин):

Подача S (мм/мин): Глубина резания t (мм):

Время обработки τ (мин): Износ по задней кромке $H_{зк}$ (мм):

Сила резания P_x (Н): Сила резания P_y (Н):

Сила резания P_z (Н): Шероховатость R_a (R_z) (мкм):

Погрешность обработки δ (мм):

Рис. 7.5. Вікно введення масивів початкової інформації, визначення коефіцієнтів математичних моделей та формування бази знань.

Визначення вихідних параметрів процесу різання для вказаної пари оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал та виду різального інструменту по введеним значенням умов обробки виконується за допомогою екранної форми, що показана на рис. 7.6.

Значення часткових показників відносної оброблюваності для вказаних умов обробки та значень експертних оцінок (вагових коефіцієнтів) для кожного із показників та комплексного показника оброблюваності можна визначити за допомогою екранної форми (рис. 7.7). Для цього треба вказати еталонну пару оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал, з якими здійснюється порівняння досліджуваної пари матеріалів.

Розв’язання задачі оптимізації режимів різання здійснюється згідно екранної форми, що наведена на рис. 7.8. Тут спочатку вбирається критерій оптимальності та вказуються значення обмежень, що визначають область допустимих рішень задачі.

Результати розрахунків, а саме оптимальні значення швидкості різання, подачі та глибини різання представляються у відповідних вікнах наданої форми.

Математическая модель

Сталь 40X13-BK8 (проходной резец)

$$P_z = c_0 \cdot V^{a_1} \cdot S^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot \tau^{a_4}$$

c_0
 a_1
 a_2
 a_3
 a_4

V (м/мин)
 t (мм)

S (мм/мин)
 τ (мин)

P_z (Н)

Рис. 7.6. Вікно виконання розрахунків вихідних параметрів процесу різання на основі математичних моделей із бази знань.

Обрабатываемость материала

Исследуемый материал: Сталь 40X13-BK8 (проходной резец)
 Эталонный материал: Сталь 40X13-T15K6 (проходной резец)

Начальные условия:

Скорость резания V (м/мин) Подача S (мм/мин)
 Глубина резания t (мм) Время обработки τ (мин)

Весовые коэффициенты:

I_{ii}/I_{Σ} H_{ii}/H_{Σ} P_{xi}/P_{Σ} P_{yi}/P_{Σ} P_{zi}/P_{Σ} R_{ai}/R_{Σ} $\delta_{ii}/\delta_{\Sigma}$

Частные коэффициенты обрабатываемости по:

интенсивности износа (I) величине износа (H)
 силе резания (Px) силе резания (Py)
 силе резания (Pz) шероховатости (Ra (Rz))
 погрешности обработки (δ)

Комплексный коэффициент обрабатываемости

Рис. 7.7. Вікно визначення відносної оброблюваності матеріалів різанням.

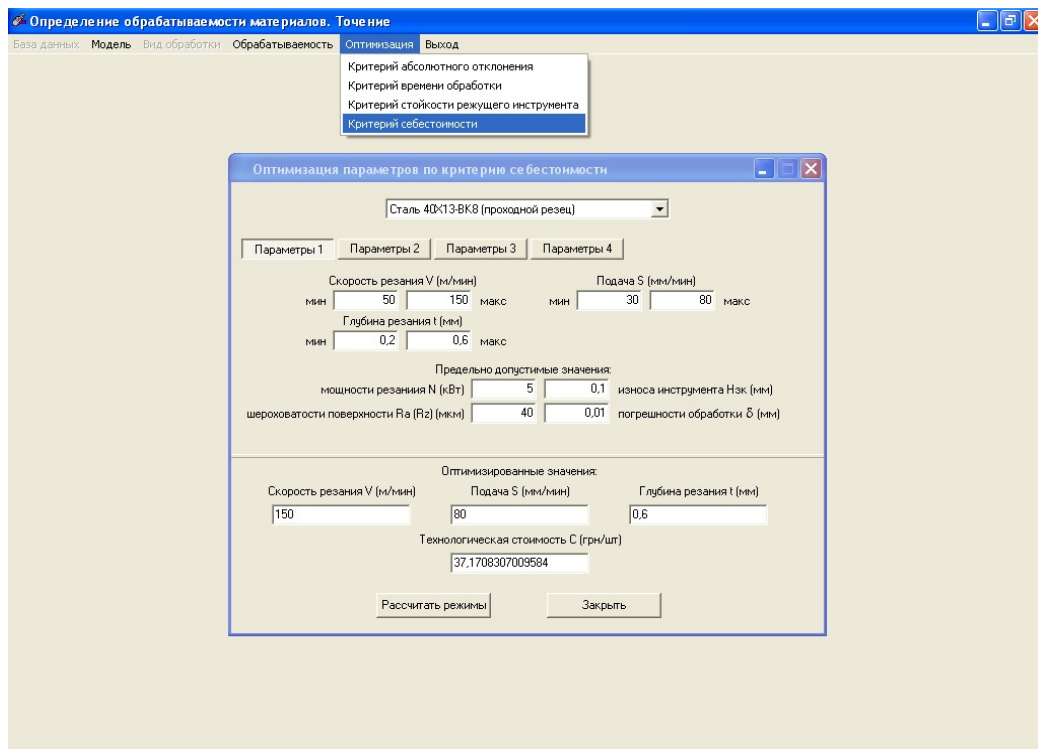


Рис. 7.8. Вікно визначення реальної оброблюваності матеріалів різанням (оптимізації режимів різання).

7.5 Практичне використання автоматизованої системи визначення оброблюваності різанням конструкційних матеріалів

7.5.1 Визначення відносної оброблюваності матеріалів

Значення відносної оброблюваності для всіх досліджуваних матеріалів обчислювали за допомогою розробленої автоматизованої системи визначення оброблюваності матеріалів різанням. При цьому використовувались попередньо одержані математичні моделі по кожному з видів механічної обробки, які представлені в базі знань системи.

В якості прикладу наведем математичні моделі, що отримані для процесу токарної обробки стали 40Х13 прохідним різцем із пластинкою з твердого сплаву ВК8. Систему математичних моделей процесу токарної обробки склали сім моделей, що визначають кожний із вихідних параметрів процесу різання: знос різця на задній поверхні, швидкість зносу, сили різання, шорсткість обробленої поверхні і точність обробки. Кожній із цих моделей відповідає свій набір коефіцієнтів та показників степенів, що є складовими елементами бази знань системи з досліджуваного методу обробки. Ці моделі мають такий вигляд:

– швидкість зношення інструменту на задній поверхні:

$$J = 0.000392 * V^{0.9633} * S^{-0.19803} * t^{-0.04244} * \tau^{1.2345}, \text{ (мм/хв);} \quad (7.16)$$

- знос інструменту на задній поверхні:

$$h = 3.7 \cdot 10^{-9} * V^{3.78} * s^{-0.9269} * t^{-1.45779} * \tau^{0.08718}, \text{ (мм);} \quad (7.17)$$

- осьова складова сили різання:

$$P_x = 90596.7 * V^{-1.07956} * s^{-0.0351} * t^{1.126632} * \tau^{0.14709}, \text{ (Н);} \quad (7.18)$$

- радіальна складова сили різання:

$$P_y = 103648.22 * V^{-1.9517} * s^{0.93243} * t^{1.39113} * \tau^{0.14582}, \text{ (Н);} \quad (7.19)$$

- тангенціальна складова сили різання:

$$P_z = 2960.037 * V^{-0.3773} * s^{-0.0675} * t^{-0.8892} * \tau^{0.07957}, \text{ (Н);} \quad (7.20)$$

- шорсткість обробленої поверхні:

$$R_a = 92893.02 * V^{-2.113358} * s^{2.5475} * t^{0.29935} * \tau^{-0.00619} * r^{40.06077} * HB^{1.65077} * \sigma_B^{1.05706} * \varepsilon^{7.9631}, \text{ (мкм);} \quad (7.21)$$

- похибка обробки:

$$\delta = 1.46 \cdot 10^{-28} * V^{1.2205} * s^{1.66102} * t^{-6.7039} * \tau^{0.2904} * P_z^{8.2828} * J^{0.4359}, \text{ (мм)} \quad (7.22)$$

Визначення оброблюваності наведемо на прикладі токарної обробки сталі 40Х13. Для виконання цих розрахунків треба отримати значення часткових коефіцієнтів і комплексного коефіцієнта відносної оброблюваності, що визначені при однакових умовах обробки як досліджуваного, так і еталонного матеріалів. При цьому як еталонний варто брати матеріал близький до досліджуваного за хімічним складом [7.1 – 7.4], процеси різання якого при різних умовах добре вивчені і мають широке застосування в реальному виробництві. В більшості випадків еталонним матеріалом є сталь 45: по-перше, на підставі вищевикладених вимог, і, по-друге, виходячи з того, що цей матеріал використовувався як еталонний в інших роботах при розробці основ визначення оброблюваності [7.5 – 7.11].

Визначення вихідних показників процесу точіння сталі 40Х13 та сталі 45 різальним інструментом з твердого сплаву ВК8 здійснювали на основі наявних в базі знань відповідних математичних моделей для вказаних матеріалів. При цьому вибрано такі режими процесу різання: швидкість $V = 90$ м/хв.; подача $s = 60$ мм/хв; глибина різання $t = 0,2$ мм; та час різання $\tau = 2$ хв.

Значення вихідних показників процесів точіння досліджуваного та еталонного матеріалів, величини часткових показників оброблюваності та

комплексний показник при умові однакової вагомості часткових показників наведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1

**Результати визначення відносної оброблюваності сталі 40X13
відносно сталі 45**

Вихідний параметр	Вихідний параметр		Часткові коефіцієнти оброблюваності K_i
	Сталь 40X13	Сталь 45	
H	0,0336	0,0237	1,42
J	0,0230	0,0199	1,56
P_x	110,0928	38,2493	2,87
P_y	85,2876	42,9238	1,98
P_z	103,7889	77,7709	1,33
R_a	24,3446	18,5448	1,31
δ	0,0483	0,0740	0,61
Комплексний коефіцієнт оброблюваності K_k			1,58

Аналіз отриманих результатів показує, що відносна оброблюваність сталі 40X13 має різні значення для окремих показників, які знаходяться в межах від 0,61 до 2,87. Найкращу оброблюваність сталь 40X13 має за точністю обробки, а найгіршу – за силами різання.

7.5.2 Визначення реальної оброблюваності матеріалів

Найбільш важливим етапом у процесі дослідження технологічних параметрів конструкційних матеріалів є визначення реальної оброблюваності. Методика визначення реальної оброблюваності, викладена в підрозділі 7.3, була реалізована у виді одного з режимів роботи автоматизованої системи. Основною задачею, розв'язуваної за допомогою реальної оброблюваності, є встановлення оптимальних режимів обробки по кожному з досліджуваних матеріалів. Раніше такі режими визначалися винятково дослідним шляхом, що вимагало значних матеріально-технічних і часових витрат. При цьому отримані значення не завжди відповідали оптимальним і не враховували специфічних особливостей конкретного виробничого процесу.

В автоматизованій системі пошук оптимальних режимів різання ведеться на підставі отриманих математичних моделей виходячи з обраного критерію оптимізації. Вибір того або іншого критерію залежить винятково від виробничих вимог, тим самим усувається один з основних недоліків попередніх методів.

За допомогою автоматизованої системи можна виконувати оптимізацію технологічних параметрів по кожному з матеріалів, занесених у базу даних. У таблиці 7.2 наведено результати такого оптимізаційного аналізу пари сталь 40X13 – BK8, на прикладі якого попередньо визначалася відносна оброблюваність по різноманітних критеріях, а саме: абсолютного відхилення, часу обробки, величини стійкості різального інструменту та собівартості обробки поверхні.

Як видно за даними таблиці 7.2, основні елементи (параметри) процесу обробки (V , s , t , τ) мають різні значення для кожного з критеріїв оптимізації. Це пов'язано з тим, що значення отриманих параметрів, яка є оптимальними для одного критерію, не задовольняють вимогам другого і навпаки. Тому, якщо виникає необхідність одночасно враховувати всі критерії, то оптимальні значення параметрів треба визначають згідно методики, що наведена в розділі 5.

Для токарної обробки сталі 40X13 прохідним різцем із пластинкою з твердого сплаву марки BK8 оптимальні значення параметрів швидкості різання, подачі, глибини і часу різання будуть наступними:

$$V = 227,25 \text{ м/хв.}; s = 194 \text{ мм/хв.}; t = 0,45 \text{ мм}; \tau = 1,33 \text{ хв.}$$

Таблиця 7.2.

Результати оптимізації технологічних параметрів пари сталь 40X13 - BK8 при токарній обробці

Пара: оброблюван ий матеріал – інструмент	Критерії оптимізації															
	Абсолютне відхилення				Час обробки				Стійкість інструмента				Собівартість			
	V	S	t	τ	V	S	t	τ	V	S	t	τ	V	S	t	τ
сталь 40X13- BK8	80	31	0,4	1,5	667	30	0,2	1,2	40	11	0,2	1,2	394	122	1,0	1,4
									Стійкість T – 60,58, хв.				Собівартість C – 12,43, грн.			

Висновки до розділу

На основі виконаного аналізу робіт, присвячених визначенню технологічних параметрів оброблюваних матеріалів, розробленої методики одержання математичних моделей і визначення оброблюваності, а також її програмної реалізації можна зробити наступні висновки:

– наявні методи визначення технологічних параметрів оброблюваних матеріалів є трудомісткими, матеріалоємними, недостатньо достовірними і не завжди придатними для використання у виробничих умовах;

- більшість прискорених методів визначення технологічних параметрів не враховують реальні умови процесу різання;
- визначення технологічних параметрів через реальну оброблюваність має більше практичне значення, дозволяє безпосередньо визначити раціональні та оптимальні умови та режими різання;
- як відносна, так і реальна оброблюваність для оптимізації процесу різання у виробництві застосовуються рідко через відсутність прикладних програм по даній проблемі;
- моделювання параметрів процесу різання доцільно проводити на основі уніфікованої залежності (7.2);
- процес визначення технологічних параметрів оброблюваних матеріалів за своєю сутністю в повній мірі реалізується на ЕОМ;
- порівняння досліджуваних характеристик за допомогою розробленої системи можна проводити при будь-яких умовах обробки;
- прискорена оцінка параметрів оброблюваних матеріалів на ЕОМ при цьому є одним з основних переваг даної системи;
- запропонована методика не вимагає додаткових витрат на проведення експериментальних досліджень у процесі роботи із системою;
- система орієнтована на обробку даних безпосередньо за результатами досліджень, а також на використання даних з інших джерел;
- розроблена автоматизована система має можливості практичного застосування в реальних умовах, а також орієнтована на подальше розширення і вдосконалення.

Запропонована методика математичного моделювання, визначення відносної оброблюваності матеріалів та оптимізації режимів різанням дозволяє:

- скоротити об'єм, час та витрати інструментального і конструкційного матеріалів при проведенні експериментальних досліджень;
- отримати адекватні математичні моделі вихідних параметрів процесу різання для будь-якого конструкційного та інструментального матеріалів;
- підвищити якість отриманих математичних моделей вихідних показників процесу різання;
- отримані математичні моделі за допомогою наданої методики зручно зберігати в базі знань для подальшого використання при визначенні оброблюваності конструкційних матеріалів та оброблюваних властивостей інструментальних матеріалів, а також для оптимізації параметрів процесу різання;
- визначити відносну оброблюваність конструкційного матеріалу як за окремим частковим показником, так і за комплексним з врахуванням експертних оцінок (вагових коефіцієнтів) кожного часткового показника;
- визначити оптимальні режими різання з врахування конкретних умов обробки деталі за визначеним критерієм оптимальності.

Надана методика визначення оброблюваності матеріалів на основі математичного моделювання є універсальною, тобто може використовуватись для будь-яких методів обробки матеріалів різанням.

Перелік посилань до розділу 7

- 7.1. Фельдштейн Э.И. Методы определения обрабатываемости металлов. – М.: Машигиз, 1946. – 143 с.
- 7.2. Фельдштейн Э.И. Обрабатываемость сталей. – М.: Машигиз, 1953. – 255 с.
- 7.3. Справочник металлиста. В 5-и т. Т. 2. Под ред. А.Г. Рахштадта и В.А. Брострема. – М.: Машиностроение, 1976. – 720 с.
- 7.4. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник // Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
- 7.5. Технология машиностроения. В 2-х т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. – 564 с.
- 7.6. Харитоненко В.Д. Исследование обрабатываемости титановых сплавов и конструкционных сталей инструментами с внутренним охлаждением: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Брянск: БИТМ, 1975. – 17 с.
- 7.7. Мирзаев А.А., Кокаровцев В.В. Автоматизация определения обрабатываемости металлов резанием // Технология и автоматика. Сб. – Вып. 42. – К.: Вища школа. 1988. – С. 79-82.
- 7.8. Вислоух С.П., Антонюк В.С., Мирзаев А.А. Автоматизация контроля механообработки по параметрам неустановившегося процесса резания // Сб. "Ресурс- и энергосберегающие технологии в машиностроении". – Одеса: Знання, 1995. – С. 139-144.
- 7.9. Махмудов К.Г., Остафьев В.А., Мирзаев, А.А. Автоматизированные методы определения обрабатываемости материалов – К.: Випол, 1995. – 91 с.
- 7.10. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
- 7.11. Дальский А.М., Барсукова Т.М., Вязов А.Ф. и др. Технология конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 2005. – 592 с.
- 7.12. Вислоух С.П., Волошко О.В. Автоматизована система моделювання та визначення раціональних умов обробки конструкційних матеріалів. Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении. Материалы 5-го Международного научно-технического семинара. – Киев, АТМ Украины, 2005. – С. 25–27.
- 7.13. Вислоух С.П., Волошко О.В. Моделювання та дослідження параметрів різання конструкційних матеріалів. / Вісник Сумського державного університету. Серія Технічних наук, № 11 (83), 2005. – Суми: Вид-во СумДУ. С. 22-27.
- 7.14. Вислоух С.П., Засименко О.В., Пилипенко А.М. Спосіб дослідження оброблюваності матеріалів різанням. Патент України №67679 А. Бюл. №6, 2004.

7.15. Вислоух С.П. Определение обрабатываемости материалов на основе математической модели процесса резания. //Сб. “Резание и инструмент в технологических системах”. Международнoй научно-технический сборник. Выпуск 55. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 50–55.

7.16. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Максимчук И.В., Остафьев В.А., Румбеишта В.А., Усачев П.А. Способ испытания материалов на обрабатываемость точением. А.с. №911217 СССР, МКИ G 01 N 3/58. – Оpubл. в БИ №9, 1982.

7.17. Свідоцтво на реєстрацію авторського права на твір № 34955. Комп'ютерна програма «Автоматизована система моделювання технологічних параметрів та визначення оброблюваності конструкційних матеріалів» («АСМВОМ»). ./ Вислоух С.П., Волошко О.В. Заявка від 14.07.2010, дата реєстрації 14.09.2010.

7.18. Вислоух С.П., Волошко О.В. Спосіб визначення оброблюваності конструкційних матеріалів. Патент на корисну модель №55404 UA B23Q 15/00. Оpubл. Бюл. № 23, 10.12.2010.

РОЗДІЛ 8

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

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 ЕОМ. 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 ЕОМ у 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 3.

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 розпізнавання 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. Але в цих роботах недостатньо використовуються сучасні математичні методи, зокрема багатовимірний статистичний аналіз – методи класифікації та розпізнання образів.

8.1 Розробка інформаційної моделі деталі

8.1.1 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. 8.1 [8.1].

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 проектною 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

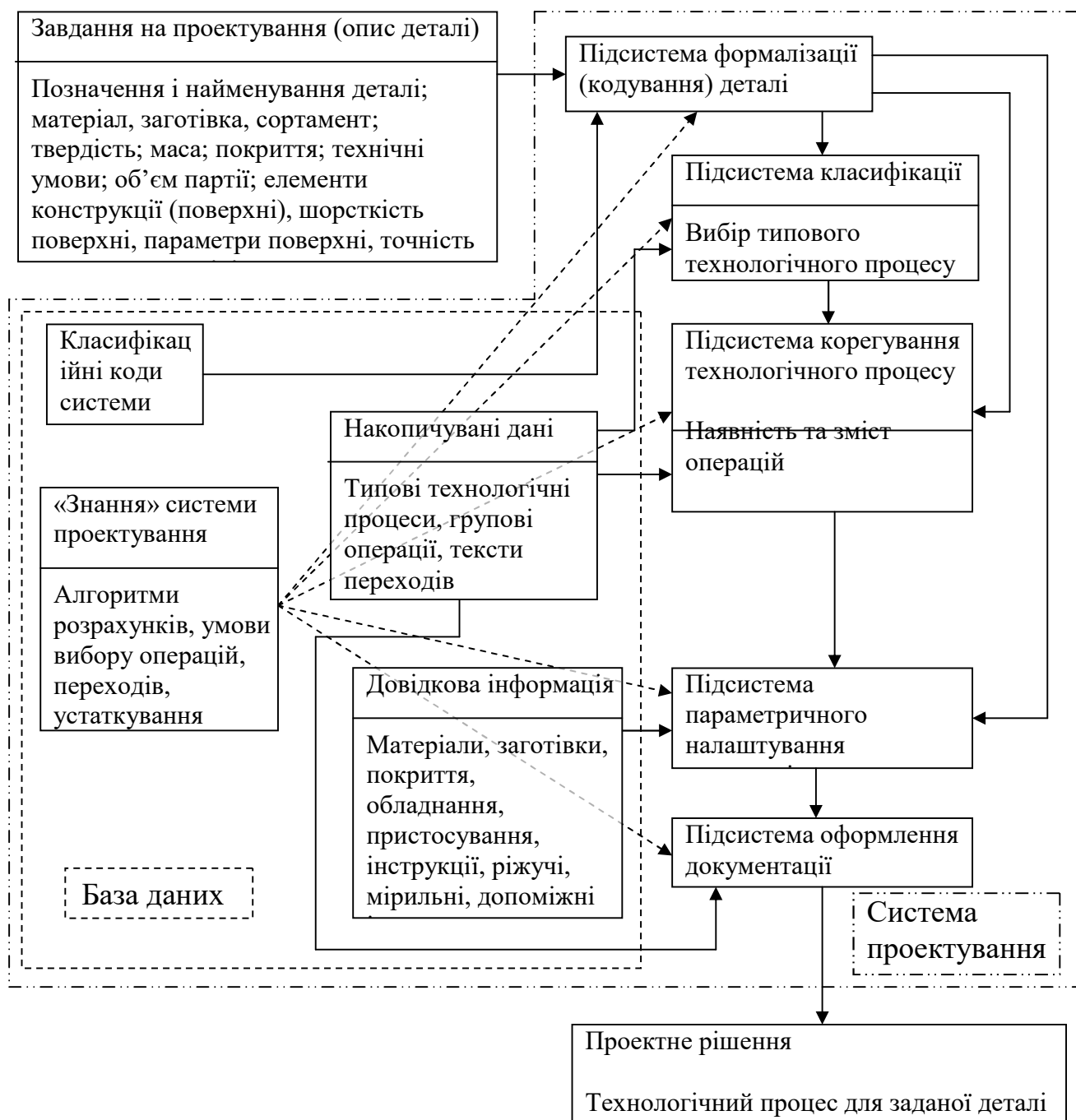


Рис.8.1. Схема інформаційних зв'язків у системах проектування технологічних процесів.

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.

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 заготовок; 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 поточкових 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 одноперехідні 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.

8.1.2 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 [8.2 – 8.6] 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.

У роботі [8.2] 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) [8.6, 8.7];

2) без виявлення підмножин з найвищою щільністю розташування деталей в n -вимірному просторі [8.8];

3) з виявленням підмножин з найвищою технологічною щільністю [8.9];

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_2 і 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 ЕОМ. 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.

Можна погодитися із С.П. Митрофановим [8.10], 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:

$$ТП = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}, \quad (8.1)$$

де a_1, \dots, a_n – конкретні логічні значення тих або інших конструктивно-технологічних ознак, а саме: структурних, точнісних і технологічних. Найскладніше описуються геометричні ознаки.

В.Д. Цветков [8.11] пропонує сукупність відомостей про деталі представляти у вигляді моделі:

$$Q_{km} = \{ \begin{matrix} < H_y, G(Q, U), (S_\phi, S_p, S_\delta), Z_o^{(1)} \\ < H_y, (S_{\phi i}, S_{p i}, S_{\delta i}), Z_i^{(2)} > \} i=1, 2, \dots, n \\ LK\Phi_q, Z_q >, {}^{(k)}q = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \} \quad (8.2)$$

За допомогою першого співвідношення описуються системні характеристики деталі як цілого: основні конструкторські бази деталі й ступені свободи, які вони фіксують $H_y = \{B_n \bar{b}_q\}$, де $B_n \bar{b}_q$ – деяка функція базових поверхонь, структурний склад деталі $G(Q, U)$, її формалізуючу й розмірну структури S_ϕ, S_p, S_δ , а також загальні відомості про деталі Z_o .

За В.Д. Цветковим формалізація деталі є багаторівневою системою, де на кожному рівні задаються структура й параметри i -того рівня. На останньому рівні k задаються тільки форма $K\Phi$ 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 чому не зовсім доцільним здається використання В.Д. Цветковим при описі своїх моделей таких визначень як „простір” і „топология”. Відмітимо, що автор, використовуючи логічні змінні й функції, а також аналізуючи параметри іноді навіть різної природи, не дотримує відомої суворості математичних визначень простору й топології.

Подібний підхід до формалізації можна знайти й у Б.Є. Челіщева, з тією лише різницею, що в [8.12] пропонується набір функцій, що характеризують той або інший параметр вихідних даних (креслення).

Функції, що, задані за допомогою операторів алгебри логіки й системи кванторів, мають досить громіздкий і абстрактний характер. Метод Б.Є. Челіщева 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 двохетапну 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. Приймаючи 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 [8.13, 8.14].

8.2 Розробка структурної схеми інформаційної моделі деталі

Автоматизоване проектування технології виготовлення деталі використовує дані, тобто її модель, яка є кодовою 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 ЕОМ, 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 [8.15 – 8.19] визначено ознаки деталі, що повинні входити до інформаційної моделі [8.20]. 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 відрізнятися 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 A – загальні відомості про деталь, які вказуються на етапі попереднього опису деталі для її класифікації; вектор B – 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. 8.2.

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 [8.21 – 8.24].



Рис. 8.2. 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 [8.25 – 8.27].

Кожна ознака деталі A_i може мати кілька значень:

$$A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\}, \quad (8.3)$$

де a_{il} – 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. Значення кодів груп матеріалів згідно з цією ознакою наведено в таблиці К.1 додатку К.;
- 3) a_6 – вагова характеристика. Значення кодів деталей різної ваги надано в таблиці К.2 Додатку К.;
- 4) a_7 – характер термічної обробки. Значення кодів для різних видів термообробки деталей наведено в таблиці К.3 Додатку К.;
- 5) a_8 – перший параметр розмірної характеристики, коди якої наведені в таблиці К.4 додатку К.;
- 6) a_9 – другий параметр розмірної характеристики, коди цієї ознаки наведені в таблиці К.5 додатку К.;
- 7) a_{10} – третій параметр розмірної характеристики, коди ознак якої дано в таблиці К.6 додатку К.;
- 8) a_{11} – максимальна точність зовнішніх поверхонь;
- 9) a_{12} – максимальна точність внутрішніх поверхонь;
- 10) a_{13} – точність інших поверхонь. Значення кодів ознак $a_{11} - a_{13}$ наведені в таблиці К.7 додатку К.;
- 11) a_{14} – мінімальна шорсткість зовнішніх поверхонь;
- 12) a_{15} – мінімальна шорсткість внутрішніх поверхонь;
- 13) a_{16} – шорсткість інших поверхонь. Значення кодів ознак $a_{14} - a_{16}$ представлені в таблиці К.8 додатку К.;
- 14) a_{17} – наявність та вид різьби. Ця ознака має коди, які наведені в таблиці К.9 додатку К.;
- 15) a_{18} – наявність та вид пазів, коди ознак якої надано в таблиці К.10 додатку К.;
- 16) a_{19} – наявність та вид вікон. В таблиці К.11 додатку К наведені коди цієї ознаки;
- 17) a_{20} – наявність та вид додаткових отворів. Ця ознака має коди, що наведені в таблиці К.12 додатку К.;
- 18) a_{21} – наявність та вид елементів зубчастого зачеплення. Коди цієї ознаки дано в таблиці К.13 додатку К.;
- 19) a_{22} – наявність та вид уступів; ознака приймає кодові значення, що наведені в таблиці К.14 додатку К.;
- 20) a_{23} – наявність та вид додаткової обробки. Коди даної ознаки дано в таблиці К.15 додатку К.

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 B 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.

Схему алгоритму формування узагальненого маршруту виготовлення деталей однієї групи наведено на рисунку 8.3.

8.3 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 3).

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 (3.3).

2. Відстань Хемінга

$$d_{ij} = \sum_{n=1}^p |x_{in} - x_{jn}|.$$

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.

2. Відстань Махаланобіса між об'єктами

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j) \Sigma^{-1} (x_i - x_j)^T}.$$

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 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}$ 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:

$$w_k = \frac{1}{n_k}, k = 1, p, \quad (8.4)$$

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:

$$w_1 = \frac{1}{n_1} \cdot 2; w_2 = \frac{1}{n_2} \cdot 1.5, k = 1, p. \quad (8.5)$$

Наведені принципи побудови інформаційної моделі деталі реалізовані в автоматизованій системі проектування технологічних процесів виготовлення корпусних деталей в приладобудуванні.

8.4 Математичне забезпечення автоматизованої системи проектування технології виготовлення корпусних деталей

Алгоритми автоматизованого технологічного проектування і відповідні їх програмні реалізації на ЕОМ відрізняються значною складністю. Якщо часткові алгоритми містять десятки логічних умов, то загальний алгоритм – тисячі. При

цьому різко зростає кількість варіантів рішень, ускладнюються 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 ЕОМ. 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 можливість 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. 8.3 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 деталі типу „корпус”

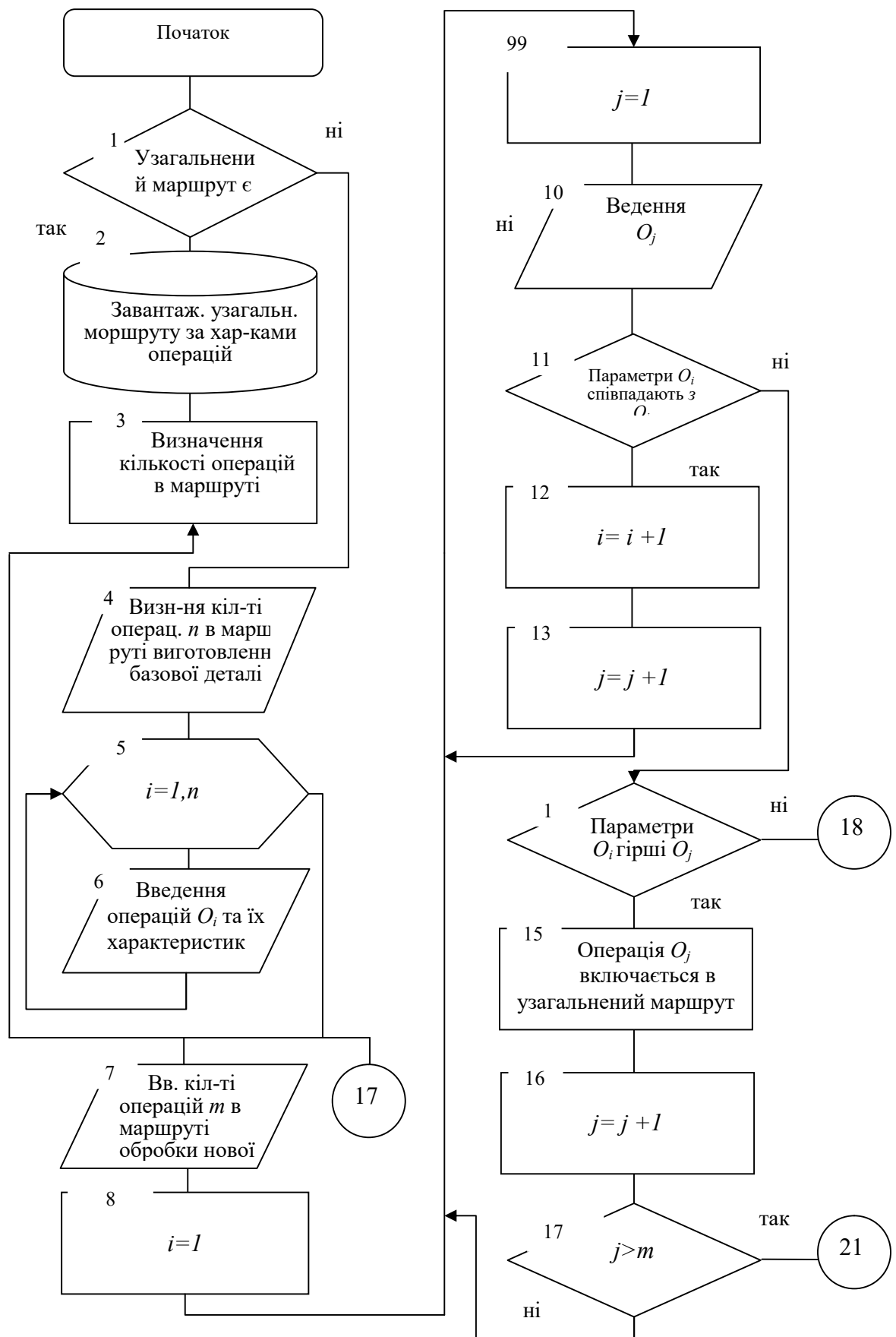
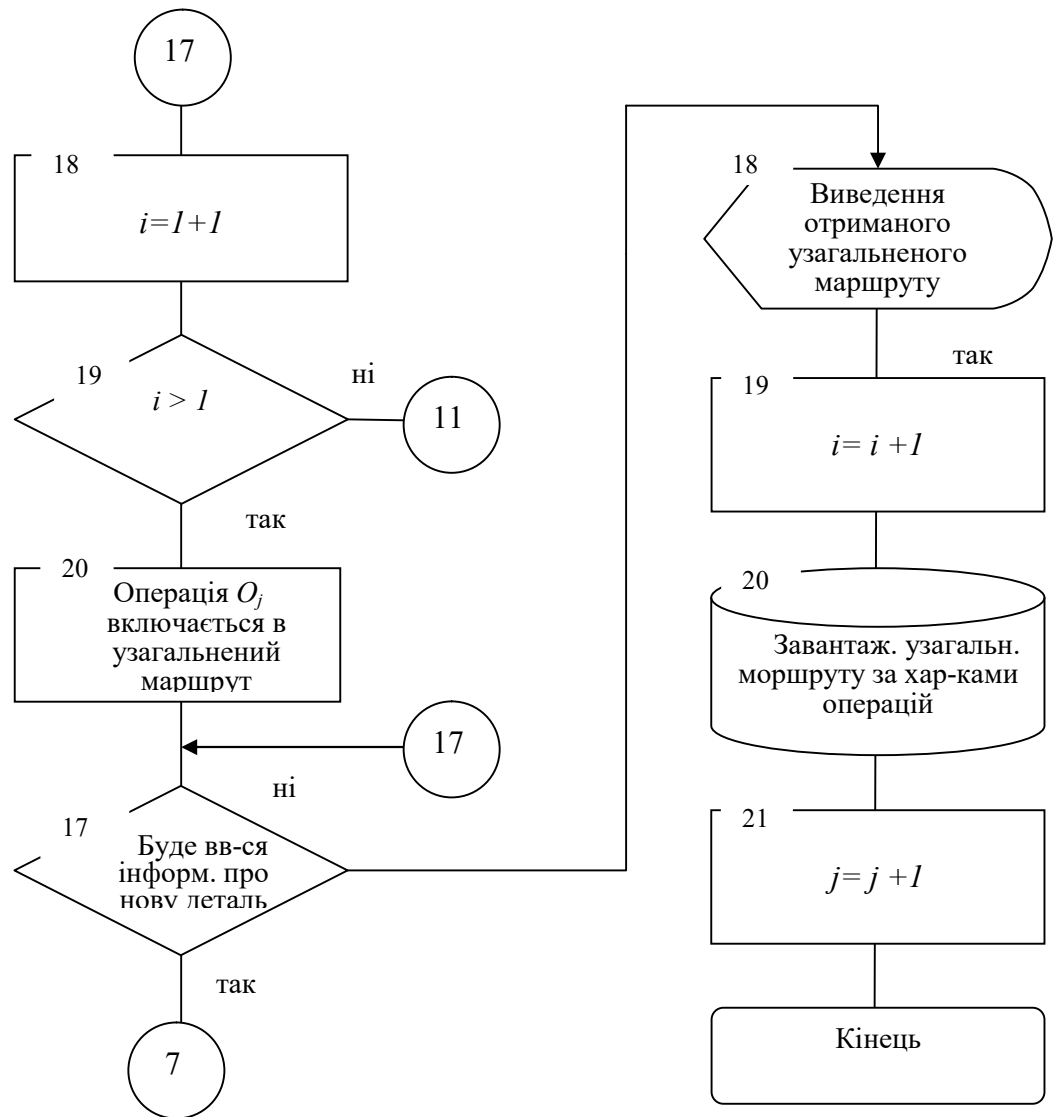


Рис. 8.3. Алгоритм формування узагальненого маршруту обробки деталей однієї класифікаційної групи.



Продовження рис.8.3.

здійснюється згідно алгоритму, який наведено на рис. 8.4. 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 деталей класифікується (блоки 3–7). 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).

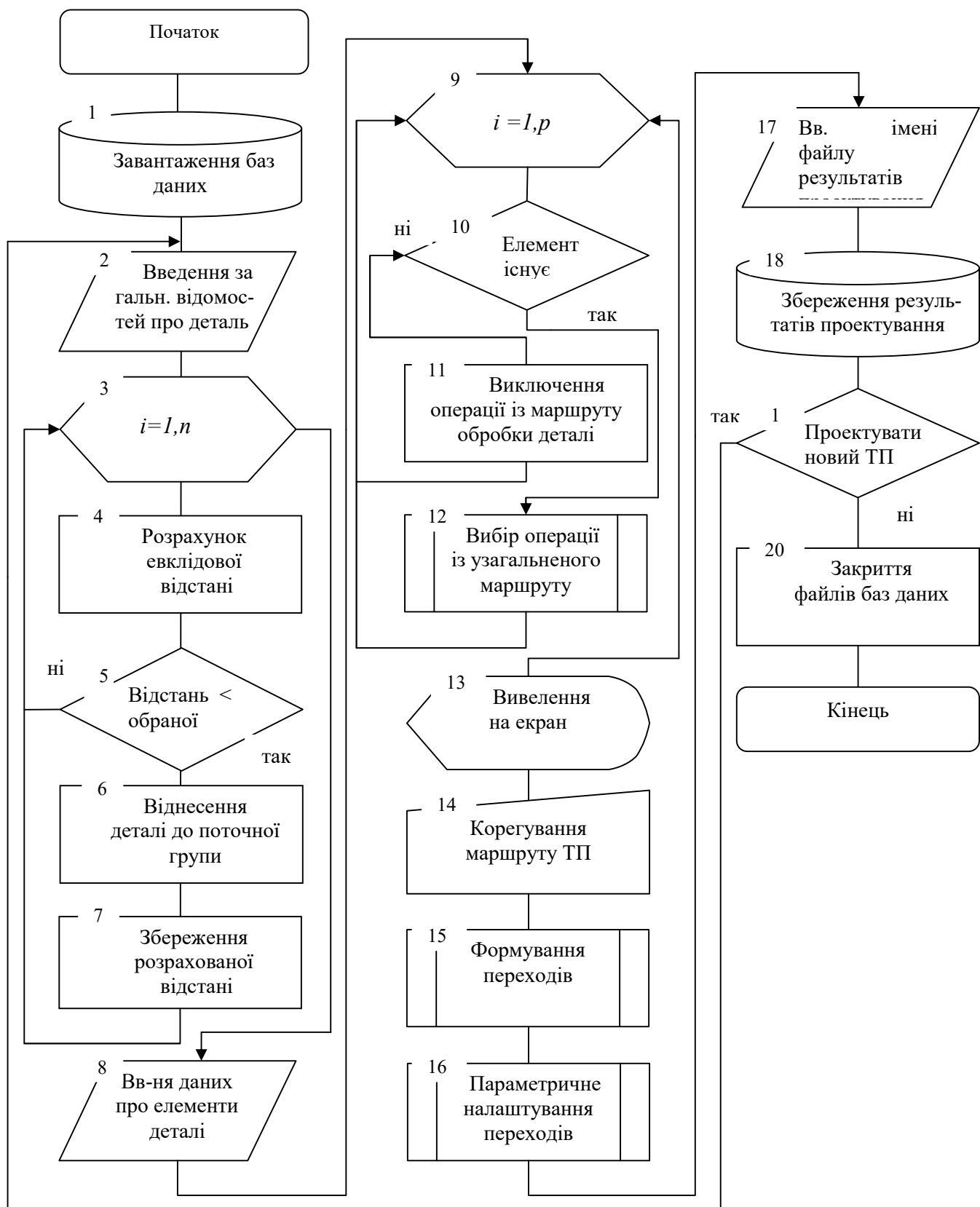


Рис.8.4. Узагальнена схема алгоритму проектування технологічного процесу виготовлення корпусних деталей.

При описанні конструктивного елемента вказується його наявність

(відсутність), у разі наявності зазначається шорсткість та точність виконання елемента. 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 елемента 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. 8.4 алгоритм використовує при проектуванні процедуру вибору операцій із узагальненого маршруту. Алгоритм цієї дії наведено на рис. 8.5.

8.5 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.

8.6 Методика автоматизованого проектування маршрутної 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. 8.6 – 8.9. 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”

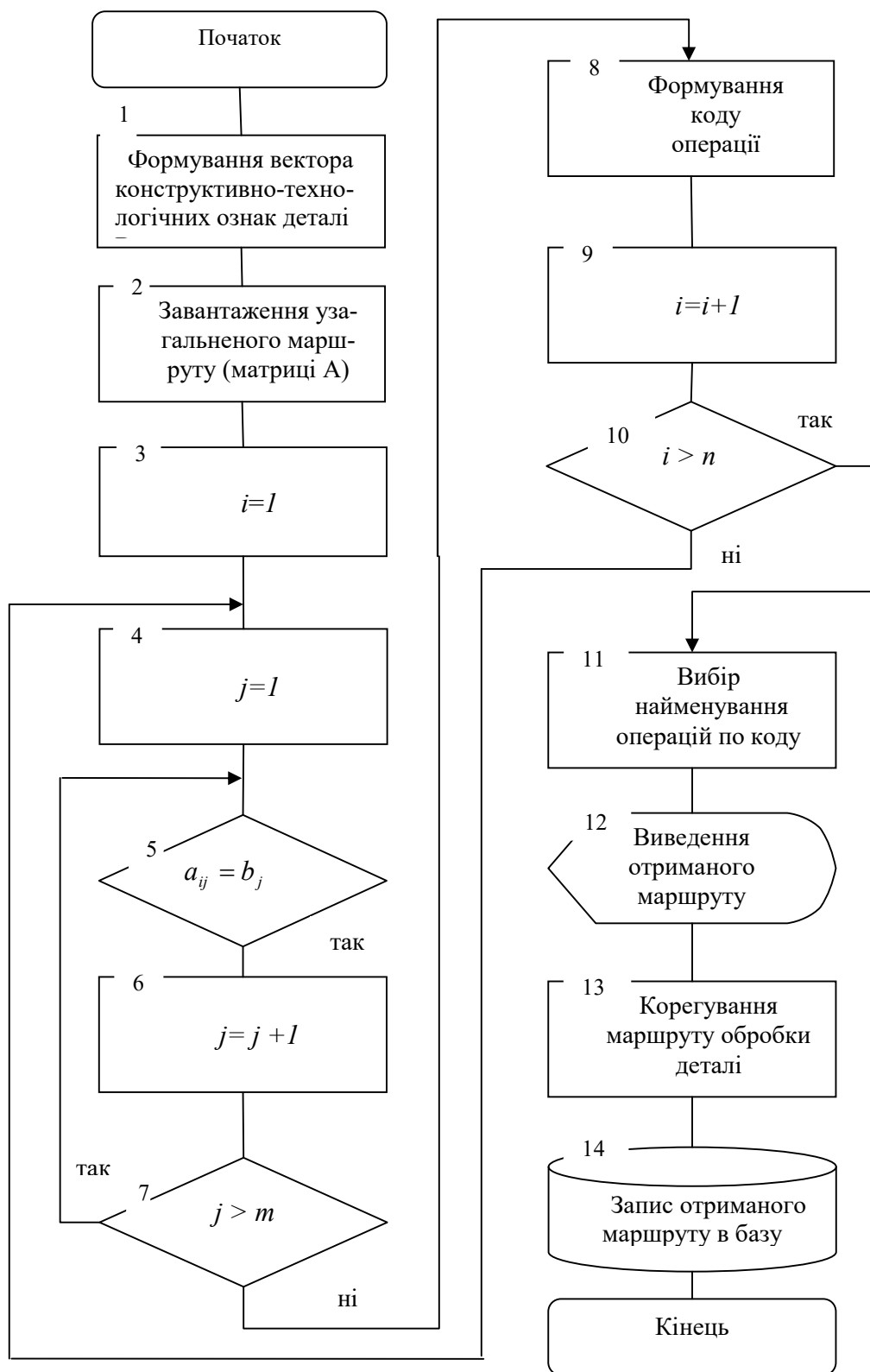


Рис. 8.5. Алгоритм вибору операцій із узагальненого маршруту.

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. 8.6), технологічних. ознак деталі згідно з пунктами меню,

що представлено на рис. 8.7 та додаткових відомостей про технологічні параметри деталі (рис 8.8). 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. 8.9). 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’явилося, 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.

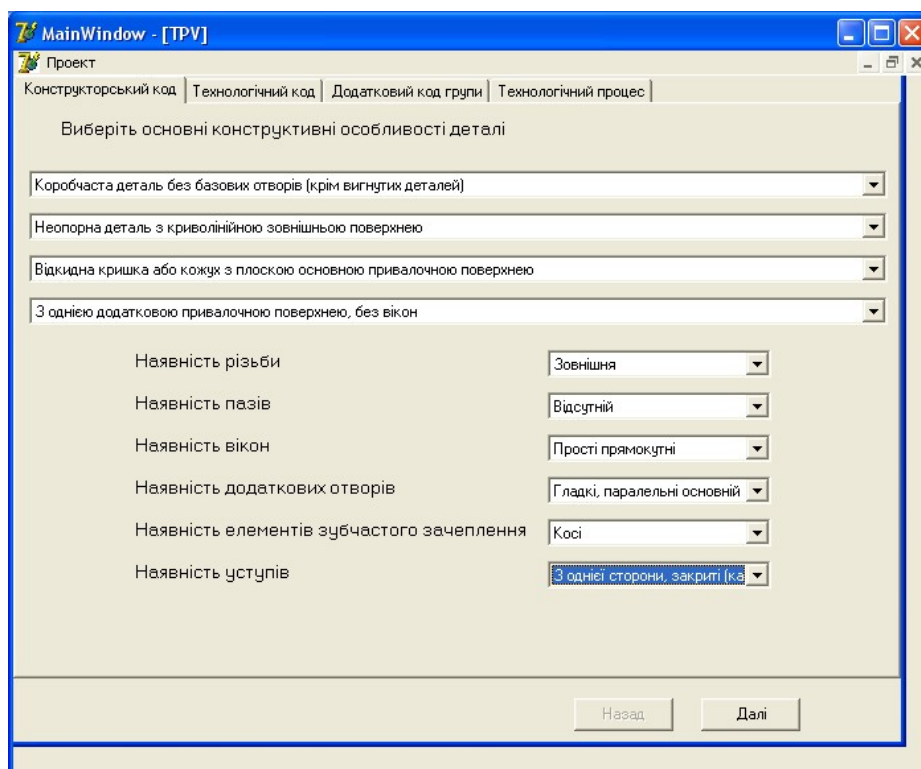


Рис.8.6. Вікно введення конструктивних особливостей оброблюваної деталі.

8.7 Автоматизоване проектування операційної технології обробки типових поверхонь деталей

Системи автоматизованого проектування операційної технології (ОТ)

обробки деталей приладів та машин, які на сьогодні пропонує ринок, дуже далекі від основного призначення цих систем.

The screenshot shows the 'MainWindow - [TPV]' window with the 'Технологічний код' (Technology code) tab selected. The window contains the following fields and options:

- Матеріал** (Material): Сталь або сплав корозійностійкий, жаростійкий чи жароміцний
- Ширина, мм** (Width, mm): 38
- Довжина, мм** (Length, mm): 25
- Висота, мм** (Height, mm): 16
- Маса, г** (Mass, g): 130
- Характер термообробки** (Heat treatment characteristic): Без термічної обробки
- Максимальна точність зовнішніх поверхонь** (Maximum accuracy of external surfaces): 6 - 7
- Максимальна точність внутрішніх поверхонь** (Maximum accuracy of internal surfaces): 8 - 9
- Точність інших поверхонь** (Accuracy of other surfaces): 10 - 12
- Мінімальна шорсткість зовнішніх поверхонь** (Minimum roughness of external surfaces): 3 0,63 по 0,08
- Мінімальна шорсткість внутрішніх поверхонь** (Minimum roughness of internal surfaces): 3 2,5 по 0,63
- Шорсткість інших поверхонь** (Roughness of other surfaces): 3 10 по 2,5
- Вид додаткової обробки** (Type of additional processing): Відсутня
- Одиниці виміру** (Units of measurement): ☒ Ra ☐ Rz
- Buttons:** Назад (Back), Далі (Next)

Рис. 8.7. Вікно введення технологічних ознак оброблюваної деталі.

The screenshot shows the 'MainWindow - [TPV]' window with the 'Додатковий код групи' (Additional group code) tab selected. The window contains the following fields and options:

- Ознаки деталі, основані на елементах технологічного процесу** (Features of the part, based on elements of the technological process):
 - Нижня поверхня деталі
 - Площини виступів на верхній поверхні
 - Площина виступу на нижній поверхні
 - Отвори на верхній та нижній стороні деталі
 - Отвори на боковій поверхні деталі
 - Бобишки
 - Вікна
 - Ступінчасті отвори на боковій поверхні деталі
 - Отвори на боковій поверхні деталі
 - Отвори на бобишках
 - Отвори на бобишках
 - Різьба в отворах на бобишках
- Конструкційний елемент існує** (Construction element exists): ☐ Ні ☒ Так
- Шорсткість конструкційного елемента** (Roughness of the construction element): 3 10 по 2,5
- Точність конструкційного елемента** (Accuracy of the construction element): 8 - 9
- Нарізати різьбу** (Thread): ☐
- Buttons:** Наступний елемент (Next element), Назад (Back), Далі (Next)

Рис. 8.8. 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, міжопераційних 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.

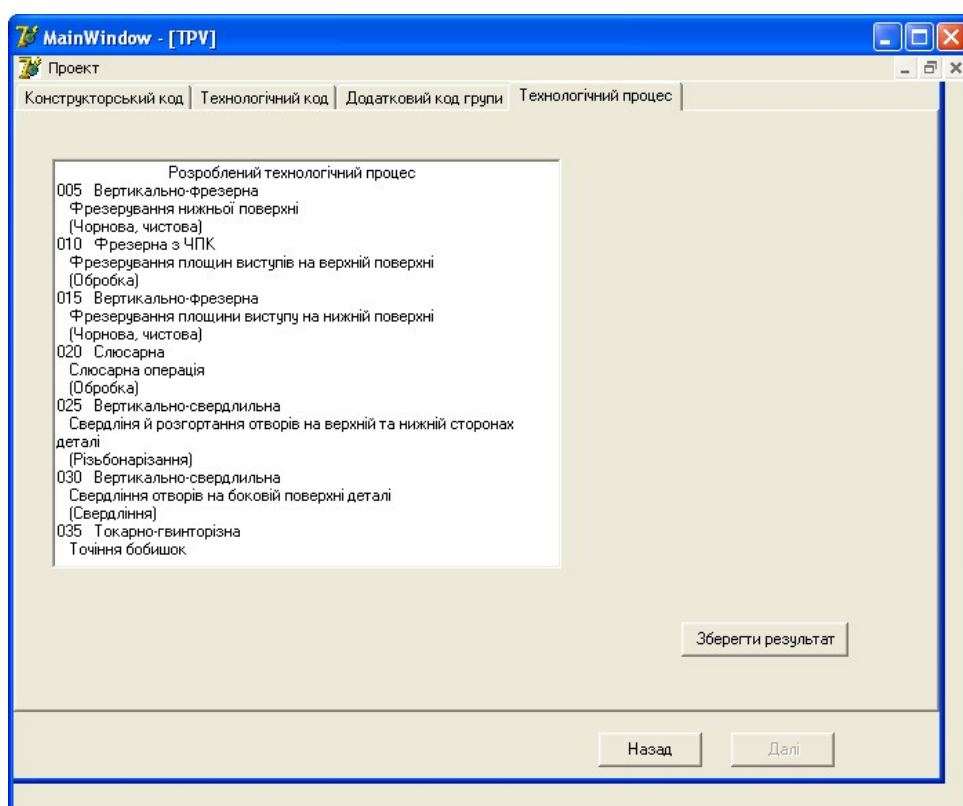


Рис. 8.9. Вікно з технологічним маршрутом виготовлення деталі.

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 [8.28 – 8.31].

Загальний алгоритм роботи системи автоматизованого проектування операційної технології (САПР ОТ) наведено на рис. 8.10.

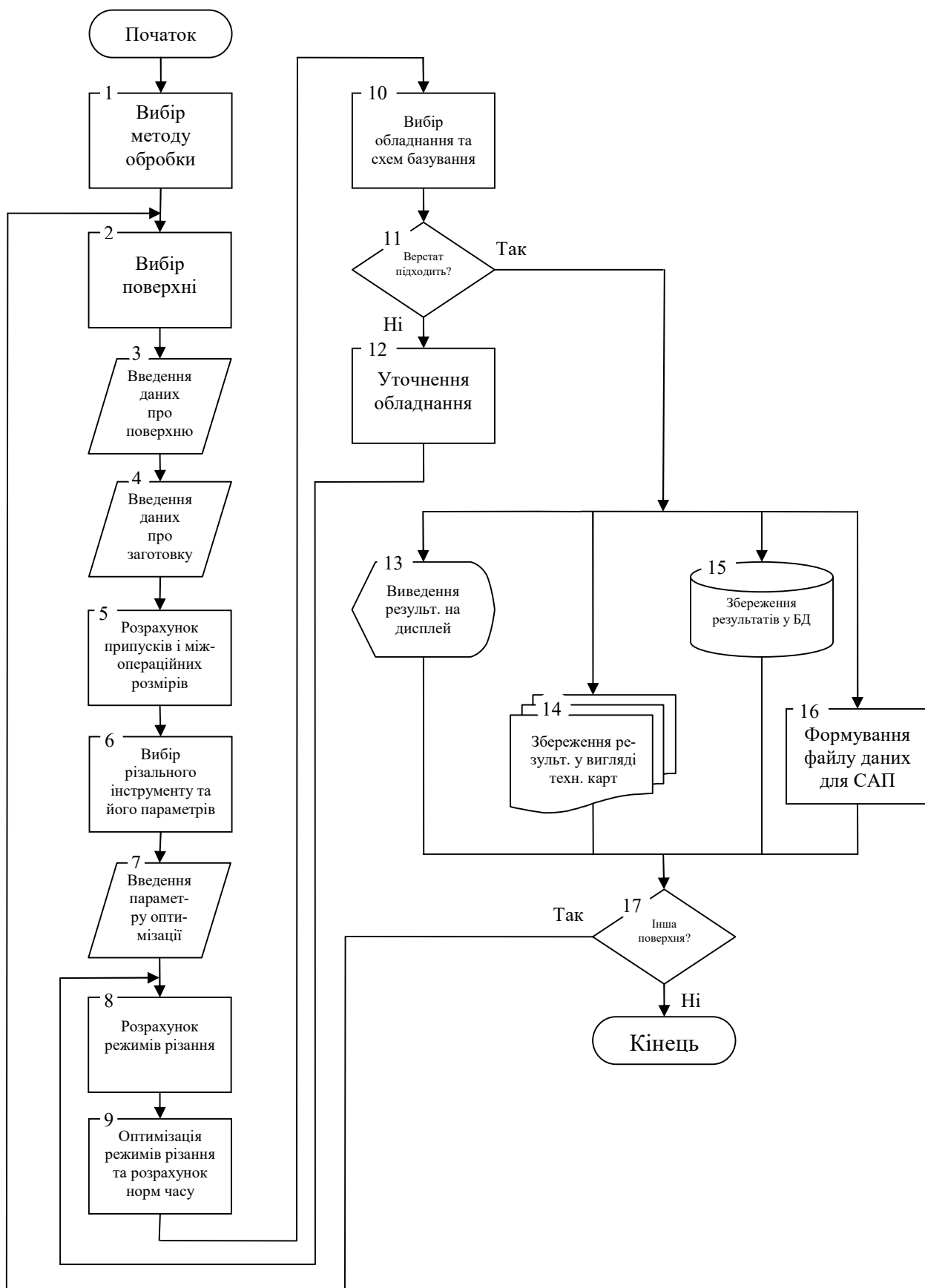


Рис. 8.10. Загальний алгоритм автоматизованого проектування операційної технології обробки деталей.

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. 8.11). Після чого здійснюється перехід до першого етапу проектування (рис. 8.12), 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. 8.13), 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.

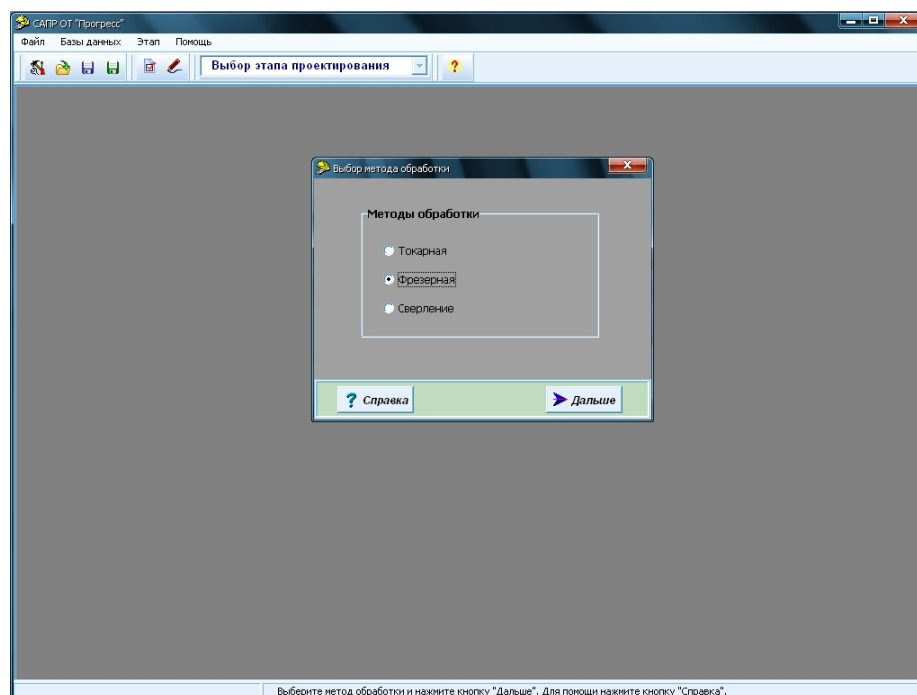


Рис. 8.11. Віконна форма вибору методу обробки.

Наступним етапом проектування є розрахунок режимів різання та норм часу (рис. 8.14). 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.

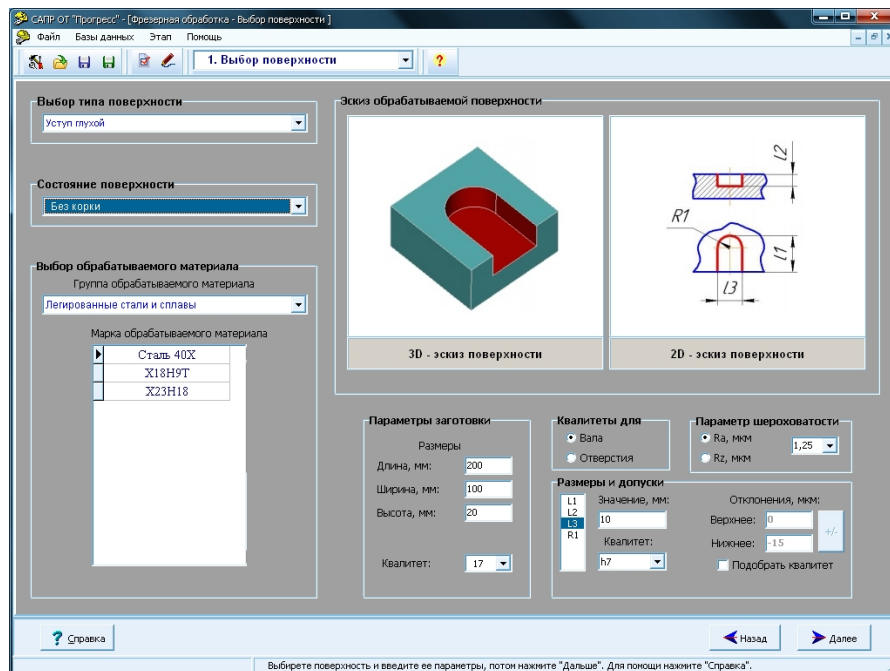


Рис. 8.12. Экранная форма первого этапа проектирования – выбор поверхности.

Четвертым этапом проектирования 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.

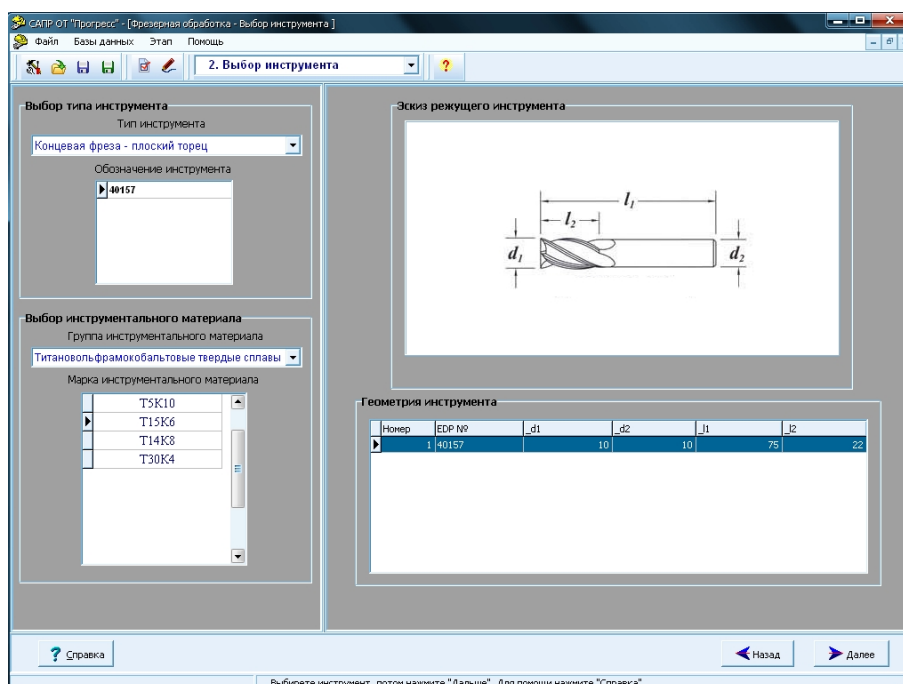


Рис. 8.13. Экранная форма второго этапа проектирования – выбор инструмента.

Останнім етапом проектування є виведення результатів проектування, де у відповідному вікні виводяться результати роботи системи (рис. 8.15). 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.

3. Режимы резания и ТН

Выбор стадии обработки:
3. Фрезерная чистовая

Выбор критерия оптимальности:
☒ Минимальная себестоимость
☐ Максимальная производительность

Режимы резания:
 Глубина резания t_f , мм: 0.75
 Подача S_z , мм/зуб: 0.045
 Скорость резания V_f , м/с: 125
 Количество оборотов n , об/мин: 3979
 Мощность резания N , кВт: 0.087

Технологическое время:
 Основное время T_0 , мин: 0.21
 Вспомогательное время T_v , мин: 0.41
 Норма штучного времени $T_{шт}$, мин: 1.62
 Норма шт.-кальк. времени $T_{шт-к}$, мин: 1.88

Сила резания:
 P_z , Н: 42.6
 P_x , Н: 46.86

Рассчитать

Справка

Назад Далее

Выберите инструмент, потом нажмите "Далее". Для помощи нажмите "Справка".

Рис. 8.14. Вікно розрахунку й оптимізації режимів різання та норм часу.

5. Результаты расчетов

Поверхность №1

Поверхность:

 Поверхность: Уступ хлыукой
 Материал: Сталь 40Х

Инструмент и оборудование:
 Тип станка: Фрезерный с ЧПУ
 Марка станка: 6720Ф3
 Тип инструмента: Концевая фреза - плоской торцев
 Обозначение инструмента: 40157
 Материал инструмента: T15K6

Режимы резания:
 Глубина резания t_f , мм: 0.75
 Подача S_z , мм/зуб: 0.045
 Скорость резания V_f , м/с: 125
 Количество оборотов n , об/мин: 3979
 Мощность резания N , кВт: 0.087

Технологическое время:
 Основное время T_0 , мин: 0.21
 Вспомогательное время T_v , мин: 0.41
 Норма штучного времени $T_{шт}$, мин: 1.62
 Норма шт.-кальк. времени $T_{шт-к}$, мин: 1.88

Сила резания:
 P_z , Н: 42.6
 P_x , Н: 46.86

Документация

САП

Справка

Назад Выбор следующей поверхности

Выберите тип и модель обрабатываемого оборудования, потом нажмите "Далее". Для помощи нажмите "Справка".

Рис. 8.15. Екранна форма останнього етапу проектування – виведення результатів.

Висновки до розділу

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.

Перелік посилань до розділу 8

- 8.1. Белянин П.Н. Управление проектами конструктивно и технологически сложных изделий во всем жизненном цикле (CALS – технологии). Справочник. //Инженерный журнал. – 1997, №8. – С. 35–38.
- 8.2. Лысенко Ю.В., Павлов В.В., Хухорев В.С., Шумакова Л.С. Основы автоматизации проектирования технологических процессов изготовления монолитных элементов, конструкций летательных аппаратов. – М.: МФТИ, 1977. – 51с.
- 8.3. Аверченков В.І. Шляхи та засоби комп'ютеризації машинобудівного виробництва // Вісн. Житомир. інж.-технол. ін-ту. Техн. науки. – 1999. – № 10. – С. 95-96.
- 8.4. Башкатов А.М., Васюткина И.А., Звонкий В.Г., Устименко С.А. Программно-технический комплекс для моделирования технологии машиностроительных изделий мелкосерийного и штучного производства. //Вісник Технологічного університету Поділля №5, 2001. – С. 153–155.
- 8.5. Азбель А.О., Звоницкий А.Ю. Организационное технологическое проектирование ГПС. – Л.: Машиностроение, 1984. – 294с.
- 8.6. Старец А.С. Повышение гибкости производства за счет автоматизации технологии проектирования. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1985. – 37 с.
- 8.7. Технологическая подготовка гибких производственных систем /С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов и др./ Под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1987. –352 с.
- 8.8. Ушаков И.Ф. Автоматизированная система технической подготовки малосерийного и серийного производства. – М.: НИИМАШ, 1979. – 57 с.
- 8.9. Кушниренко С.Г. Оценка технологичности и унификации машин. – М.: Машиностроение, 1980. – 160 с.
- 8.10. Технологическая подготовка гибких производственных систем /С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов и др./ Под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1987. – 352 с.
- 8.11. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. – Минск: Наука и техника, 1979.– 266 с.
- 8.12. Челищев Б.Е. и др. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении /Б.Е. Челищев, И.В. Боброва, А. Гонсалес – Сабатер; Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. –264 с.
- 8.13. Иллюстрированный определитель деталей общемашиностроительного применения. Руководящий технический материал. Классы 40 и 50 Общесоюзного классификатора промышленной продукции. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 238 с.
- 8.14. Технологический классификатор деталей машиностроения и приборостроения. Часть I. Под ред. В.Р. Верченко. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 168 с.

8.15. Горанский Г.К. Кодирование информации о машиностроительных деталях в автоматизированных системах технологического проектирования. – Минск, 1989. – 183 с.

8.16. Горанский Г.К. Методы разработки и оптимизации таблиц решений для автоматизированного проектирования в АСТПП. Стандартизация программ выбора решений и группирования деталей. – Минск: 1989. – 60 с.

8.17. Куликов Д.Д. Метод кодирования операционных заготовок для механической обработки деталей /Автоматизация технологической подготовки производства. – Минск: Ин-т технической кибернетики АН БССР, 1985. – С. 85-93.

8.18. Куликов Д.Д., Яблочков Е.И. Язык описания операционных заготовок /Автоматизация технологической подготовки производства. – Минск: Ин-т технической кибернетики АН БССР, 1986. – С. 114–124.

8.19. Модели данных и их взаимодействие в САПР и технологической подготовке производства / С.Б. Додонов, Л.А. Петрушенко, А.Е. Войцедский, Н.Е. Афанасенко, Б.Ф. Синельник // Управляющие системы и машины. – 2000. – № 3. – С. 3–10.

8.20. Вислоух С.П. Формалізація опису оброблюваної деталі. //Сб. “Резание и инструмент в технологических системах”. Международный научно-технический сборник. Выпуск 57. – Харьков, ХГПУ, 2000. – С. 40–45.

8.21. Справочник технолога приборостроителя. В 2-х т. Т. 1. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. П. В. Сыроватченко, – М.: Машиностроение, 1980. – 607 с., ил.

8.22. Ачкасов А.Н., Терган В.С., Козлов В.И. Технология точного приборостроения. – М.: Высшая школа, 1981. – 351 с.

8.23. Миллер Э.Э. Техническое нормирование труда в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1972. – 248 с.

8.24. Справочник технолога- машиностроителя. /Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мецерыкова. – М.: Машиностроение, 1985, т.1, – 521 с., т.2, – 248 с.

8.25. Никифоров А.Д., Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф. Процессы управления объектами машиностроения. – М.: Высшая школа, 2001. – 455 с.

8.26. Кожина Т.Ю., Солодов Д.В. Компьютеризированная технология изготовления деталей как элемент комплексной автоматизации. // Вісник Технологічного університету Поділля №5, 2001. – С. 137–140.

8.27. Автоматизация проектирования технологических процессов: Учеб. пособие / В.С. Антонюк, С.П. Вислоух, В.И. Аверченков. – К.: УМК ВО, 1989. – 116 с.

8.28. Ланіга О.С., Вислоух С.П. Система автоматизованого проектування операційної технології. // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте. Материалы 8-го Международного научно-технического семинара (26-28 февраля 2008 г., г. Свалява, Карпаты). – Киев, 2008. – С.137-139.

8.29. Лапіга О.С., Вислоух С.П. Модуль автоматизованого проектування операційної технології обробки різанням. //Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 10-го Юбилейного Международного научно-технического семинара. 22-26 февраля 2010г., г. Свалява. – Киев, АТМ Украины, 2010. – С. 130-132.

8.30. Лапіга О.С., Вислоух С.П. Сучасні тенденції розробки систем автоматизованого проектування операційної технології. // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. №1(23), 2009. – С.139-142.

8.31. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Лапіга О.С. Автоматизоване проектування операційної технології обробки типових поверхонь деталей. / Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 77. – С 3-7.

РОЗДІЛ 9

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 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 методик.

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 твердотілого проектування виробів Solid Works.

9.1 Технологічні основи автоматизації проектування технології механоскладальних робіт в приладобудуванні

9.1.1 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 [9.1 – 9.33].

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 [9.34]:

- 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:

$$y = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n),$$

де $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – 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.

9.1.2 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:

$$F = \langle F_1, \dots, F_i, \dots, F_n \rangle.$$

Кожна функція рішення F_i може бути представлена кортежем функцій спеціального вигляду:

$$F_i = \langle Q_1, P_1, Q_2, P_2, \dots, P_{n-1}, Q_n \rangle,$$

де $Q_m = f(x_1, \dots, x_n)$ – функції, що дозволяють описати взаємодію об'єктів технології за етапами проектування технології;

x_1, \dots, x_n – параметри проектування технології;

$P_m = (Q_i, \dots, Q_j)$ – 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 приєднаних 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; T_v – 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

$$\begin{aligned} T_a &= f_1(Q, R) \\ T_s &= f_2(Q, R) \end{aligned}$$

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

$$T_{sb} = f_3(A_{sb}),$$

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 Π , які треба виконати для забезпечення складання виробу з необхідною якістю, тобто мають місце залежності

$$T_v = f_4(P_v) \quad \text{та} \quad T_p = f_5(\Pi).$$

У свою чергу, як видно з схеми, склад технологічних операцій Π , види операцій P_v і склад складальних одиниць теж є залежними параметрами. Склад технологічних операцій Π залежить від виду операції P_s , тобто

$$\Pi = f_6(P_v, P_s),$$

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

$$P_v = f_7(P_s, P_t)$$

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 P_s і організаційної форми складання P_{or} , тобто

$$A_{sb} = f_8(P_{or}, P_s, T_s),$$

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 [9.35].

Послідовність складання або певна послідовність з'єднання елементів виробу визначається технічними вимогами та економічною доцільністю процесу [9.36].

9.2 Технологічні особливості складання виробів приладобудування

Всі виконувані в процесі виготовлення приладів операції, що забезпечують визначену точність приладів та надійність їх роботи можна поділити на [9.34]:

- 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-повідомчі 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.

Особливості автоматизованого проектування технологічних процесів складання виробів в приладобудуванні наведено в [9.37 – 9.42].

9.2.1 Класифікація та групування виробів приладобудування

Використання групової технології в приладобудівному виробництві є одним із основних напрямків підвищення його ефективності. Стимує широке застосування групової технології в даний час на підприємствах недостатній ступінь автоматизації технологічної підготовки групового виробництва.

Аналіз існуючих систем технологічної підготовки групового виробництва (ТПГВ) [9.43] 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 [9.44].

Класифікація зазвичай визначає розподіл множини об'єктів за заданими ознаками на підмножини, які мають назву класифікаційних групувань. У ГОСТ 17369-78 визначені два методи класифікації [9.45]: 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 [9.40].

Основною особливістю процесу класифікації, алгоритм якого наведено на рис. 9.1, є метод послідовного наближення. Очевидно, що цей процес скінченний, як скінченний набір властивостей, що описують класи деталей.

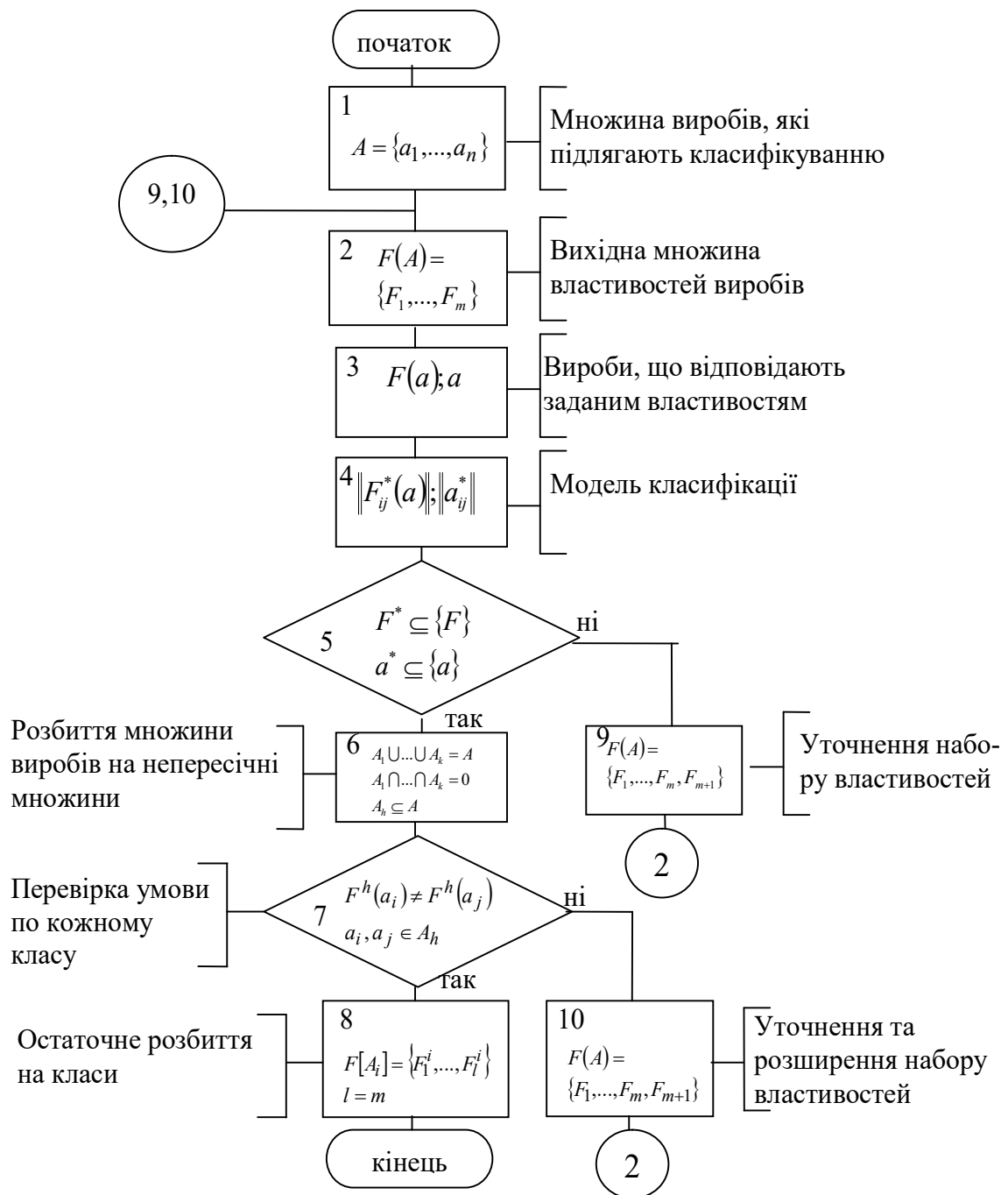


Рис. 9.1. Алгоритм класифікації виробів приладобудування.

9.2.2 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 [9.41, 9.46, 9.47], 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} [9.37].

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 ЕОМ.

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 [9.37, 9.38].

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 $i = 1, 2, \dots, n$ - 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 [9.37, 9.39].

9.3 Моделювання технології складання приладів

9.3.1 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 [9.48]. 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. 9.2.

9.3.2 Інформаційна модель технологічного процесу складання

Інформаційна модель процесу складання будується на основі схеми цільових функцій [9.37]. Первинні області визначення цих функцій є початковими множинами інформаційної моделі.

Схема цієї моделі відтворює послідовність створення технологічного процесу складання (рис. 9.3). В ній введено такі позначення: A – складальний елемент, C – обладнання, B – технологічна база, P – технологічний перехід, O – 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 [9.46, 9.48 – 9.50].

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 [9.37].

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.



Рис. 9.2. Схема інформаційних та логічних зв'язків при проектуванні технології складання виробу.

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 $A_{sb} = f(P_{or}, P_s, T_s)$.

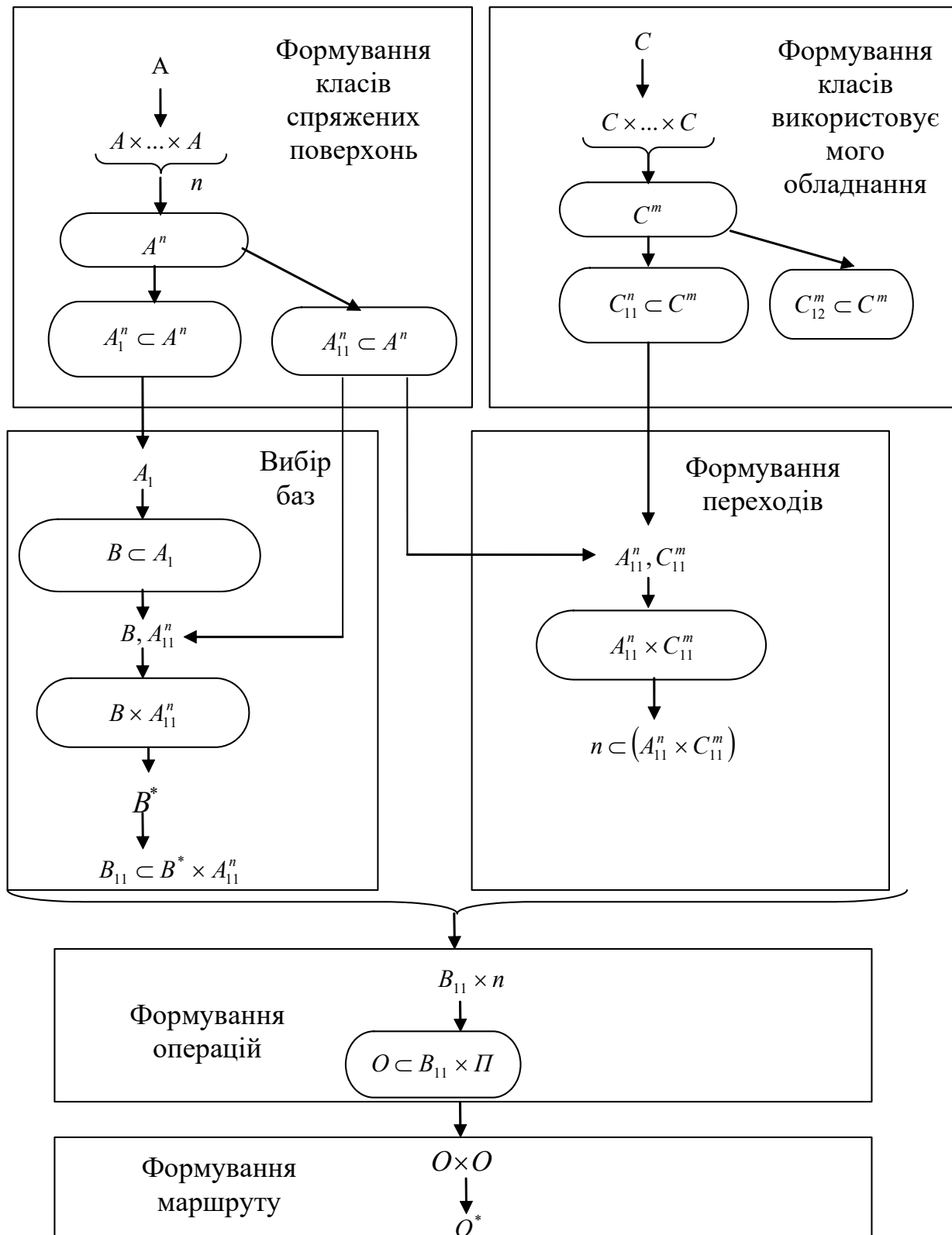


Рис. 9.3. Інформаційна модель процесу проектування технології механоскладальних робіт.

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 [9.32].

Задача визначення комплекту для кожного вхідного елемента складальної одиниці [9.41] 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

$$R_b^1 = \{(w_1, w_2) / w_1 \in Sb_i, w_2 \in Sb_i, w_1 \xrightarrow{b} w_2\},$$

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 $AB \subseteq Sb_i^2$ [9.41]:

$$AB = \{(w_1, w_2) / w_1 \in Sb_i, w_2 \in Sb_i, w_1 \xrightarrow{b} w_2\}$$

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 .

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 $AD \subseteq Sb_i$

$$AD = \{(w_1, w_2) / w_1 \in Sb_i, w_2 \in Sb_i, w_1 - \subset w_2\},$$

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 $Sb_j^1 \subseteq Sb_j^j$

$$Sb_j = \{(w_1, \dots, w_n) | w_1 \in SA_1, \dots, w_n \in SA_n, \forall w_i \forall w_j [w_i \# w_j]\},$$

де $w_i \# w_j$ – відношення зв'язаності 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, $R = \{r_1, \dots, r_k\}$.

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.

9.3.3 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.

Методика рішення задачі технологічного поділу будується на основі прийнятих технологічних положень, що наведені в [9.39, 9.41].

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 [9.41].

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, \dots, S_k з однаковою ознакою „група роботи”.

2. Множини S_1, \dots, 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, \dots, 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 $\{G_{s1}, \dots, G_{sk}\}$, 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.

9.3.4 Формування порядку складання виробу

Впорядкування груп складальних одиниць по рівнях виконується відповідно до алгоритму технологічного поділу [9.41].

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)

$$S_k = \left\{ S_j / S_i \leftrightarrow S_j, S_i \in S^1 \right\}.$$

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 $S < s^1, \dots, s^n >$.

7. Вибирається чергове з’єднання s_i з (s^1) .

8. Впорядковуються деталі в з’єднанні згідно групового доступу $S_i = \langle A_1, \dots, A_i, \dots, A_n \rangle$, 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 [9.41].

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. 9.4).

9.4 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 [9.51].

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

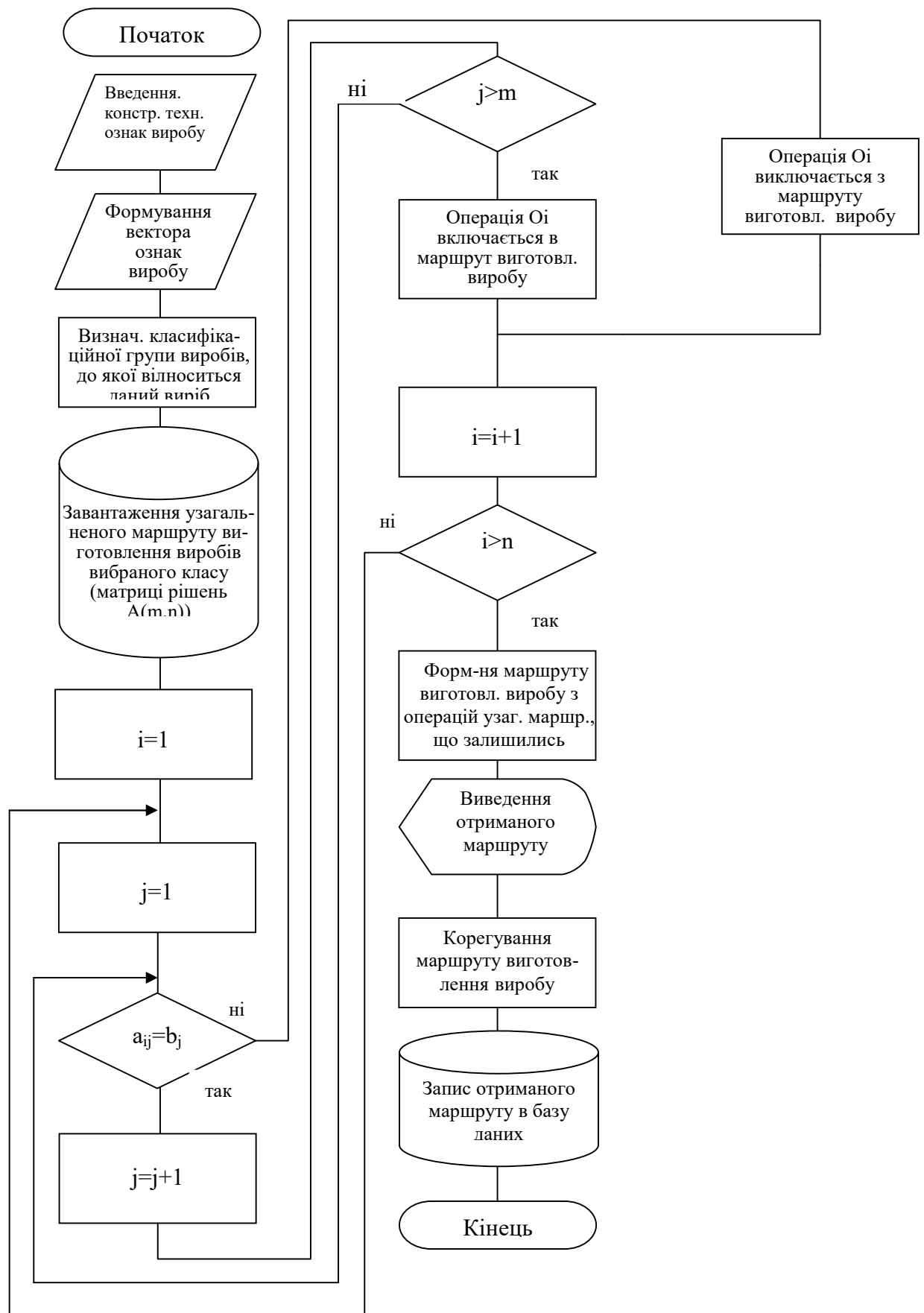


Рис.9.4. Узагальнений алгоритм формування маршрутної технології складання приладів.

повинна враховувати особливості приладобудівного виробництва та базуватись на діючих галузевих керуючих матеріалах.

9.4.1 Структурна схема системи

Для логічного структурування створюваної автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт (АСПТ МСР) розроблено структурну схему системи (рис. 9.5).

Система АСПТ МСР „ТехноМастер” 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 ЕОМ 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”.

9.4.2 Функціональна схема системи проектування

Функціональна схема АСПТ МСР призначена для наочного представлення можливостей даної системи, та можливих дій користувача для досягнення певних результатів під час роботи з системою (рис. 9.6).

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 АСПТ МСР „ТехноМастер”. 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

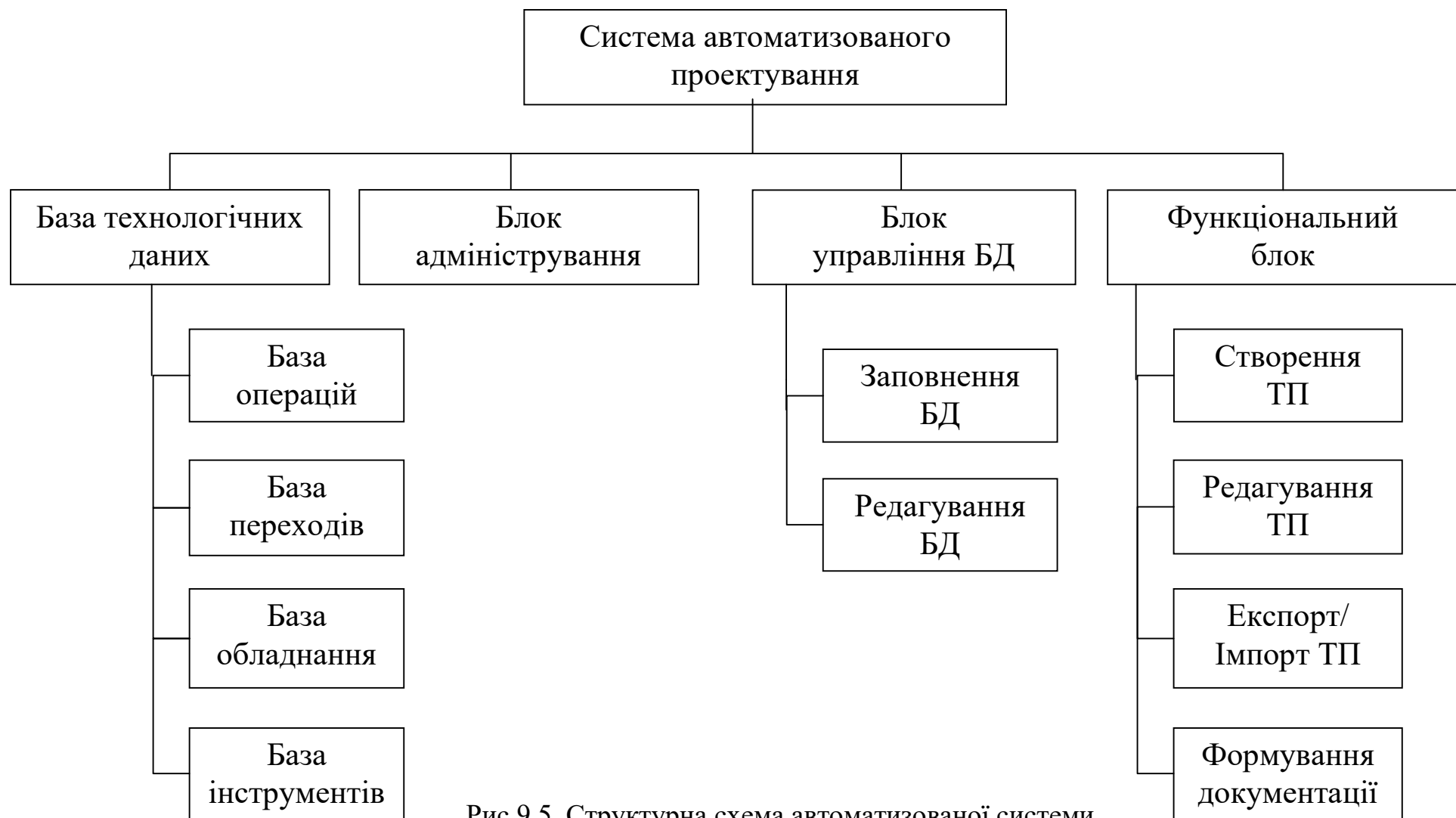


Рис.9.5. Структурна схема автоматизованої системи.



Рис. 9.6. Функціональна схема автоматизованої системи.

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.

Розробка структурної та функціональної схем дозволяє перейти до наступного етапу – розробки інформаційного забезпечення майбутньої системи.

9.4.3 Інформаційне 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 ЕОМ 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 ЕОМ.

Умовно-постійна інформація. 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. 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. Їх структура має табличний вид і приведена в додатку Л (таблиці Л.1– Л.15). Взаємозв'язки між базами даних відображені на рис.9.7.

Інформаційне забезпечення автоматизованої системи можна представити в вигляді узагальненої схеми, що зображена на рис 9.8.

Класифікатор технологічних операцій і переходів. Дійсний стандарт встановлює коди і найменування типових операцій, коди і найменування типових переходів технологічних процесів складально-монтажного виробництва.

Стандарт розроблений у відповідності й у розвиток ОСТ 4М 0.040.012; ОСТ 4М 0.040.010; ОСТ 4М 0.054.264; ОСТ 4М 0.054.265; ОСТ 4М 0.054.267.

Стандарт обов'язковий для всіх підрозділів підприємства, що розробляють технологічні процеси складально-монтажного виробництва з застосуванням електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), а також може бути використаний при розробці технологічних процесів без використання засобів обчислювальної техніки.

Класифікаційні таблиці класифікатора. Класифікатор технологічних операцій і переходів, що був застосований при розробці автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт знаходиться в додатку М.

Коди і найменування типових технологічних операцій приведені в таблиці М.1 додатку М.

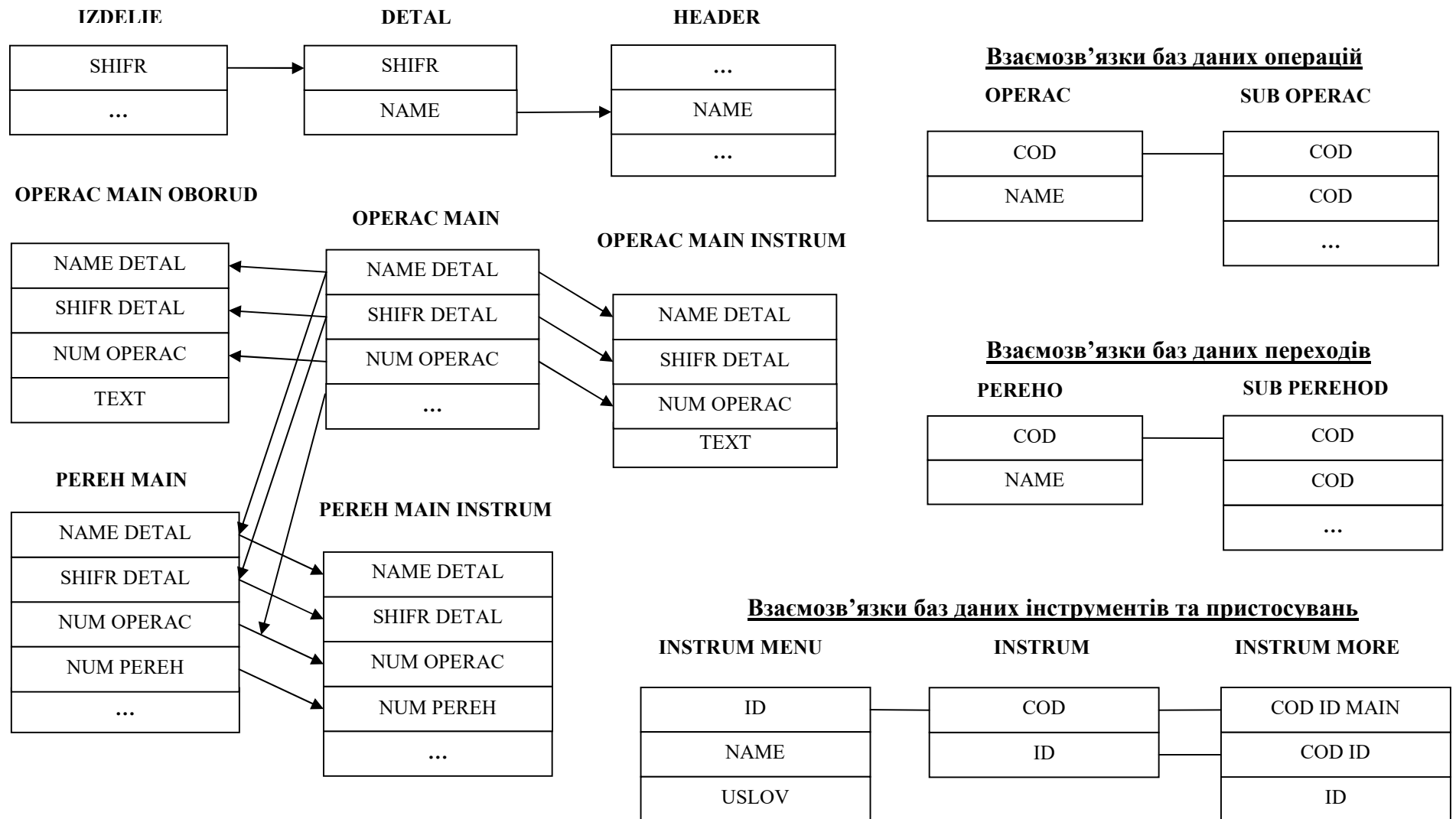


Рис. 9.7. Схема інформаційних зв'язків в базі даних АСПІТ МСР.

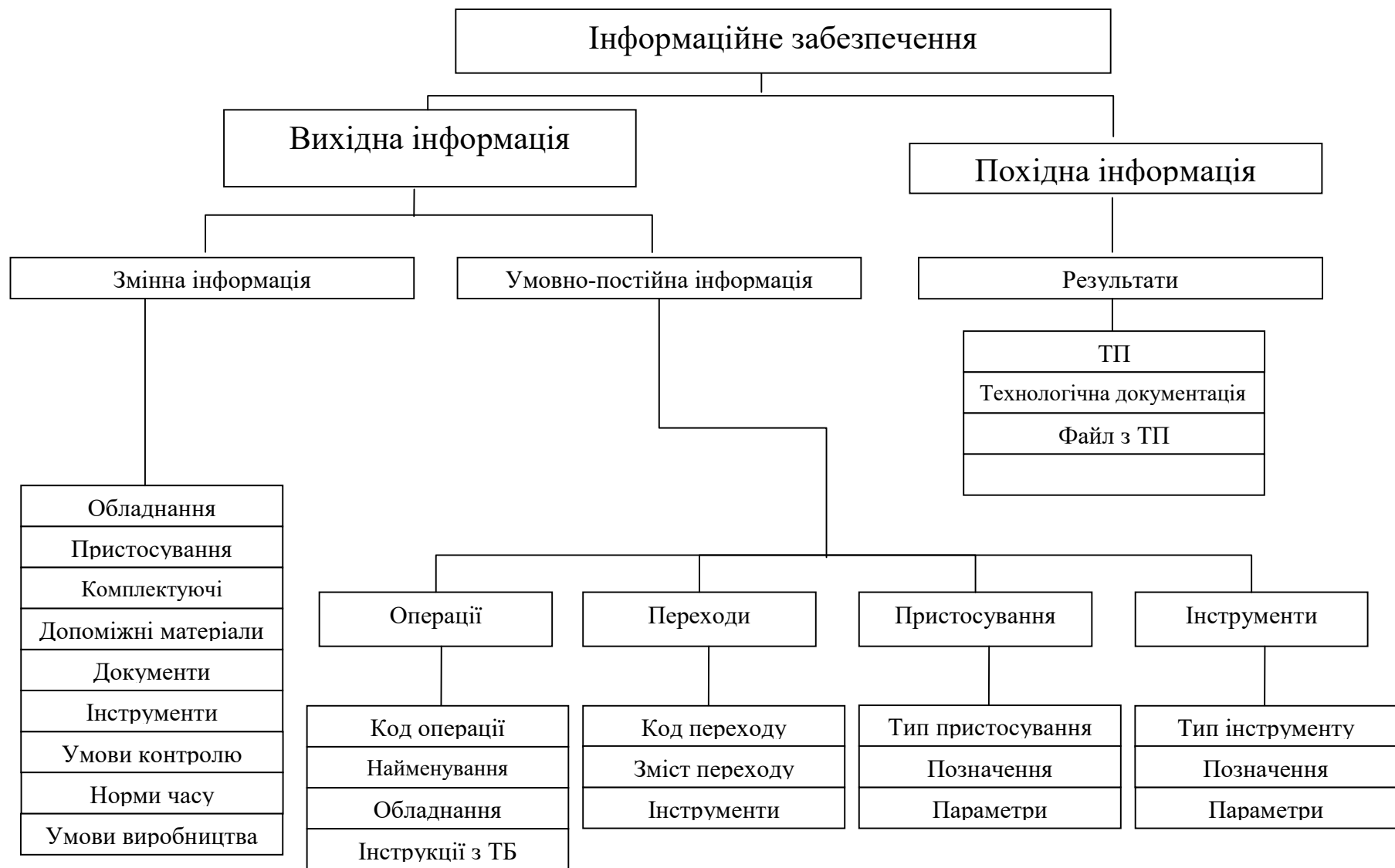


Рис. 9.8. Схема інформаційного забезпечення АСПТ МСР.

Коди і зміст типових технологічних операцій і переходів приведені в таблиці М.2 додатку М.

Коди і зміст технічних вимог і вказівок до технологічного процесу чи окремої операції приведені в таблиці М.3 додатку М.

9.4.4 Математичне забезпечення системи

Математичне забезпечення автоматизованої системи проектування технології механоскладальних робіт складається з трьох складових системи ADMIN, ENGINE та TMASTER.

Алгоритм підсистеми адміністрування ADMIN. Робота підсистеми ADMIN здійснюється за алгоритмом, який представлено на рис 9.9. Цей алгоритм вказує порядок та послідовність дій користувача під час роботи в програмі адміністрування ADMIN.

Алгоритм підсистеми роботи з БД ENGINE. Робота підсистеми ENGINE здійснюється за алгоритмом, представленим на рис 9.10. Цей алгоритм вказує порядок та послідовність дій користувача під час роботи підсистеми з базами даних ENGINE.

Алгоритм роботи системи автоматизованого проектування „ТехноМастер” (TMASTER). Алгоритм функціонування системи автоматизованого проектування „ТехноМастер” (TMASTER) наведено на рис.9.11. При запуску цього алгоритму на виконання, розпочинається робота автоматизованої системи проектування технологічних процесів механоскладальних та електромонтажних робіт.

Отже, математичне забезпечення (алгоритм програми) є основою роботи програми. Розроблені схеми алгоритмів допомагають зорієнтуватися в можливостях АТПТ МСР „ТехноМастер”, а за допомогою алгоритмів докладно розібратися у функціональних можливостях програми.

9.4.5 Програмне забезпечення системи

Програмне забезпечення включає в себе сукупність програм загального та спеціального призначення.

Загальне програмне забезпечення призначене для планування і організації процесу обробки інформації, операцій обслуговування ЕОМ. Основою системного програмного забезпечення є операційна система. Автоматизована система проектування технології механоскладальних робіт спроектована для роботи в 32-х розрядній операційній системі Windows модифікацій 95/98/Me/NT/200X/XP тощо.

Система розроблена на об'єктно-орієнтованій мові програмування Delphi. При проектуванні використовувались переваги об'єктно-

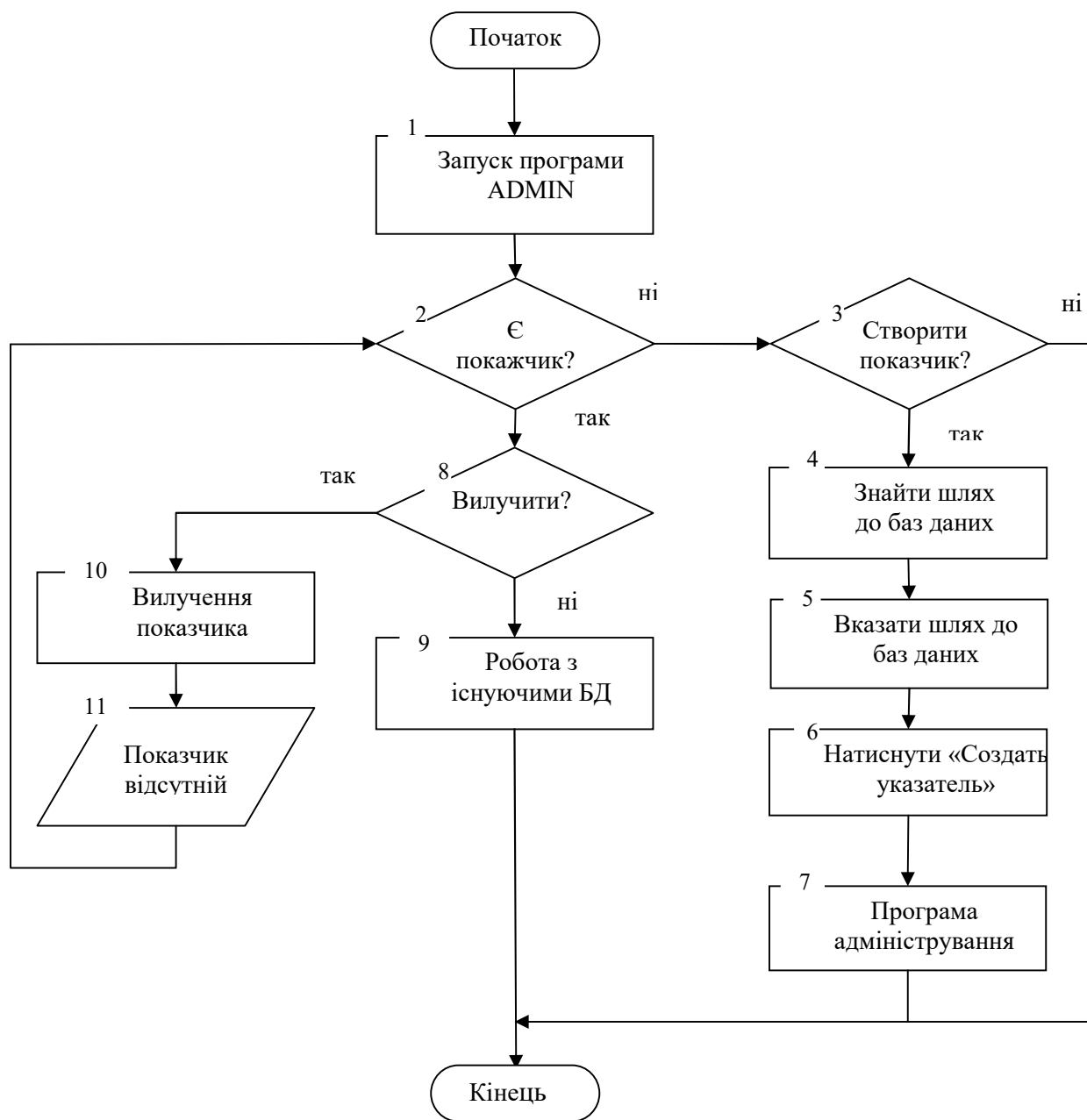


Рис.9.9. Алгоритм адміністрування системи.

орієнтованого підходу та візуального програмування, якими володіє Delphi. В якості засобу доступу до БД обрано Borland Database Engine (BDE).

В розробленій системі як **прикладне** програмне забезпечення використано відкомпільовані за допомогою компілятора системи Delphi 6.0, наступні програми:

- ADMIN.EXE - програма адміністрування баз даних;
- ENGINE.EXE – програма заповнення та редагування баз даних

нормативної інформації;

– TMASTER.EXE – програма розробки технологічного процесу.

Загальний вигляд програмного забезпечення представлено в вигляді схеми, яка наведена на рис.9.12.

9.4.6 Методичне забезпечення системи

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”.

Інсталяція АСПТ МСР „ТехноМастер”. Весь процес інсталяції системи займає досить мало часу і не викликає ніяких труднощів навіть у початкового користувача. Простота встановлення дозволяє в короткий термін підготувати систему автоматизованого проектування „ТехноМастер” до роботи. Для встановлення системи необхідно вставити CD-диск у пристрій для читання лазерних компакт-дисків (CD-ROM).

Першою операцією є встановлення інструменту доступу до баз даних – програми Borland Database Engine (BDE). Для цього необхідно запустити програму SETUP з каталогу INST_BDE, який розташований в кореневій директорії на інсталяційному компакт-диску. В процесі встановлення цієї програми необхідно буде вказати шлях, а саме розділ диску і назву папки, куди необхідно встановити програму BDE (шлях можна залишити по замовчанню – C:\Program Files\BDE). Після успішного встановлення іконка програми BDE (BDE Administrator) з'явиться на панелі управління. Це означає, що програма успішно встановлена.

Після встановлення програми BDE необхідно скопіювати з компакт-диску на жорсткий диск директорію TMASTER, вказавши необхідний шлях.

Робота з програмою адміністрування ADMIN. В програмі адміністрування вказуються шляхи до фізичного розташування баз даних системи автоматизованого проектування „ТехноМастер”, створюється спеціальний показник, що у подальшому сполучає роботу системи АСПТ МСР з підключеними базами даних. Робота з програмою адміністрування розпочинається після запуску файлу ADMIN.EXE, шлях розміщення якого C:\TMASTER\ADMIN.EXE.

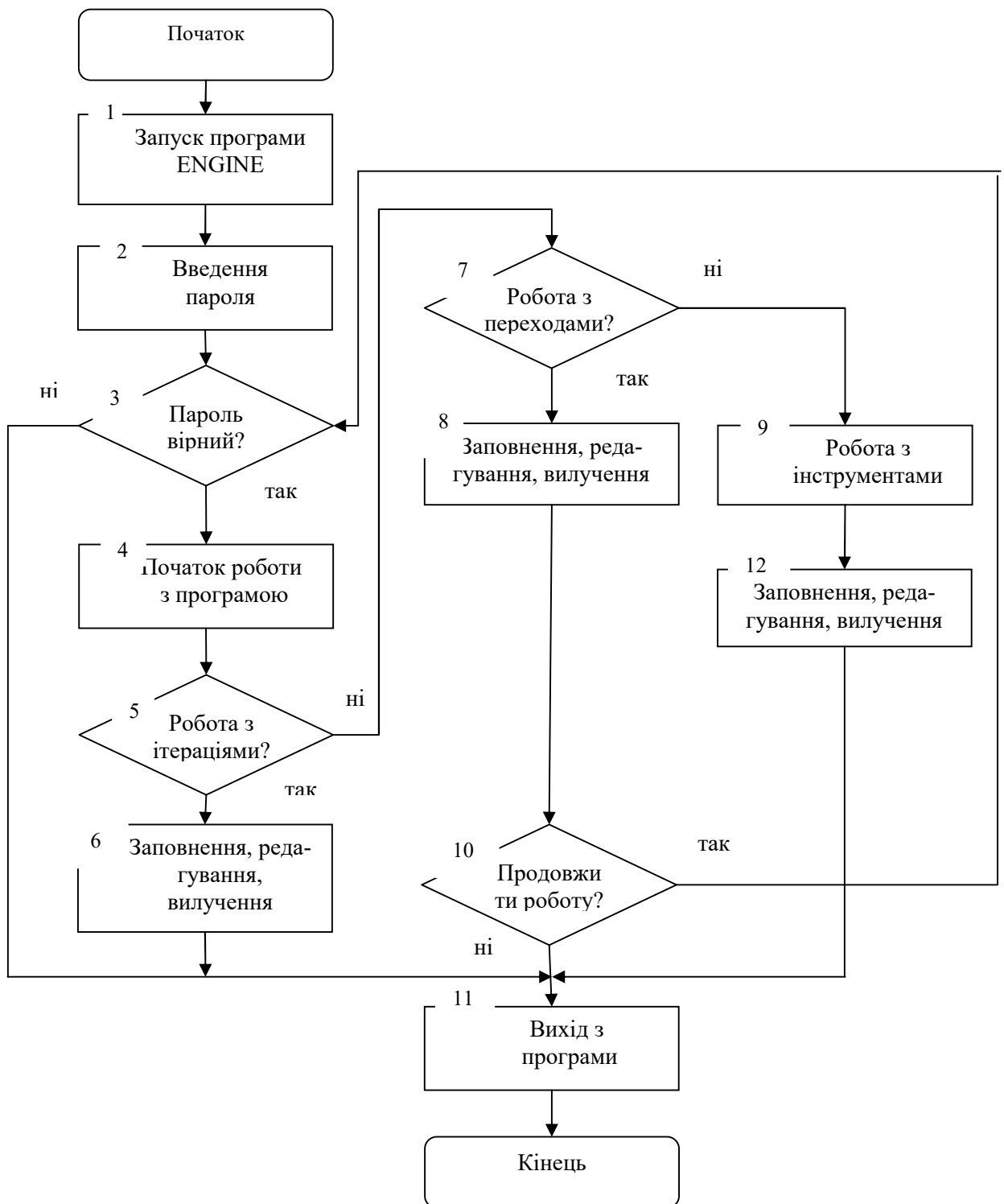


Рис. 9.10. Алгоритм роботи з базою даних.

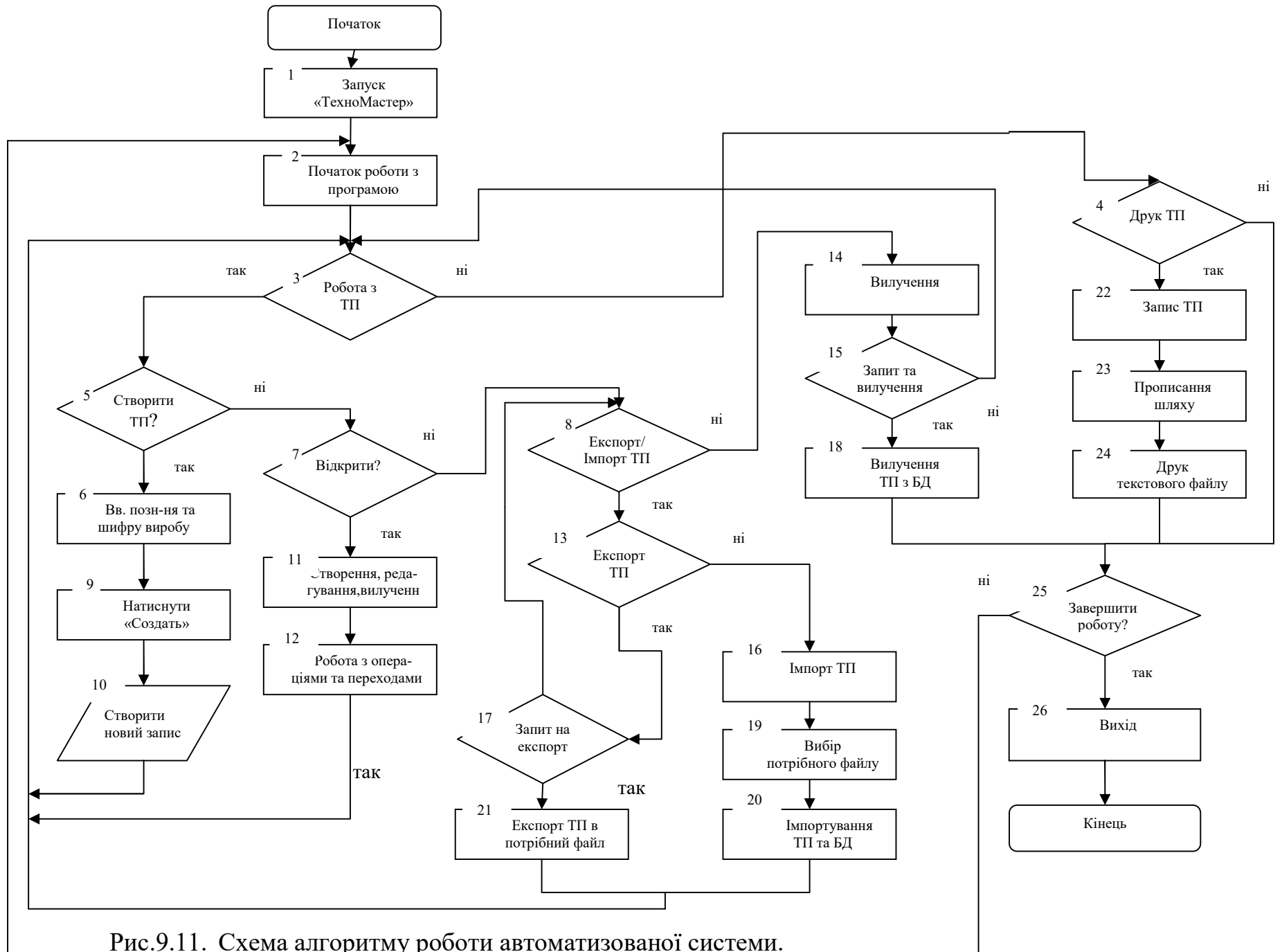


Рис.9.11. Схема алгоритму роботи автоматизованої системи.



Рис.9.12. Схема програмного забезпечення системи.

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. 9.13). Після створення покажчика у верхньому розділі вікна з'являться шляхи покажчика до баз даних (рис. 9.14).

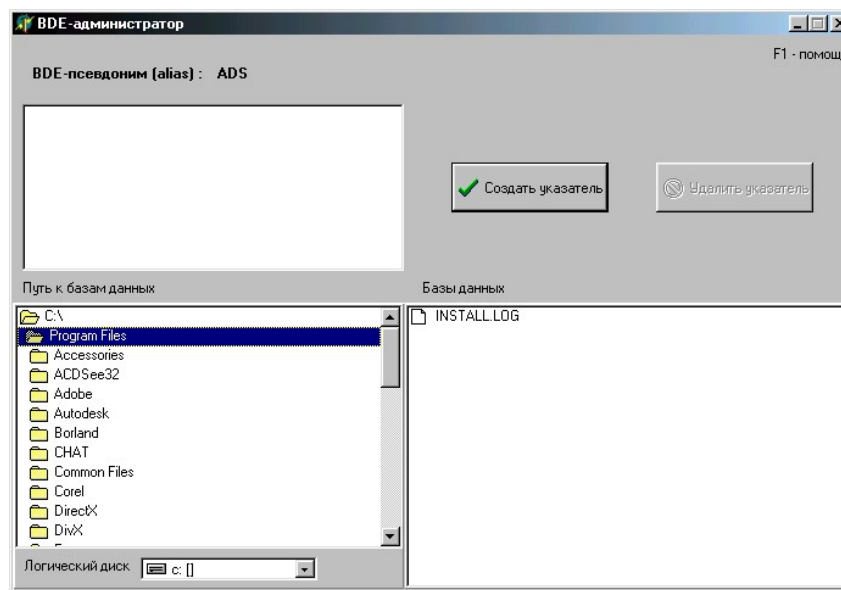


Рис.9.13. Вікно першого запуску програми ADMIN.

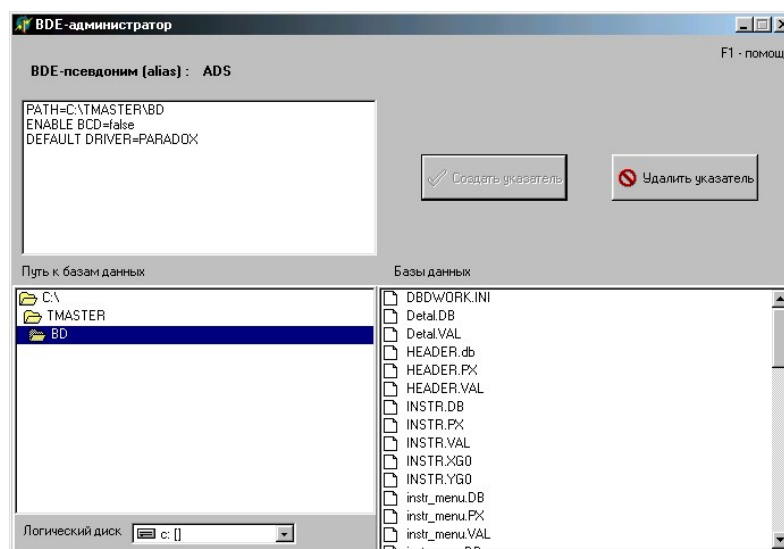


Рис. 9.14. Зміст вікна при вдалому створенні покажчика.

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. 9.15).

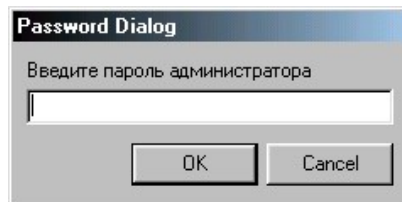


Рис. 9.15. Вікно введення паролю доступу до баз даних.

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 управління БД (рис. 9.16).

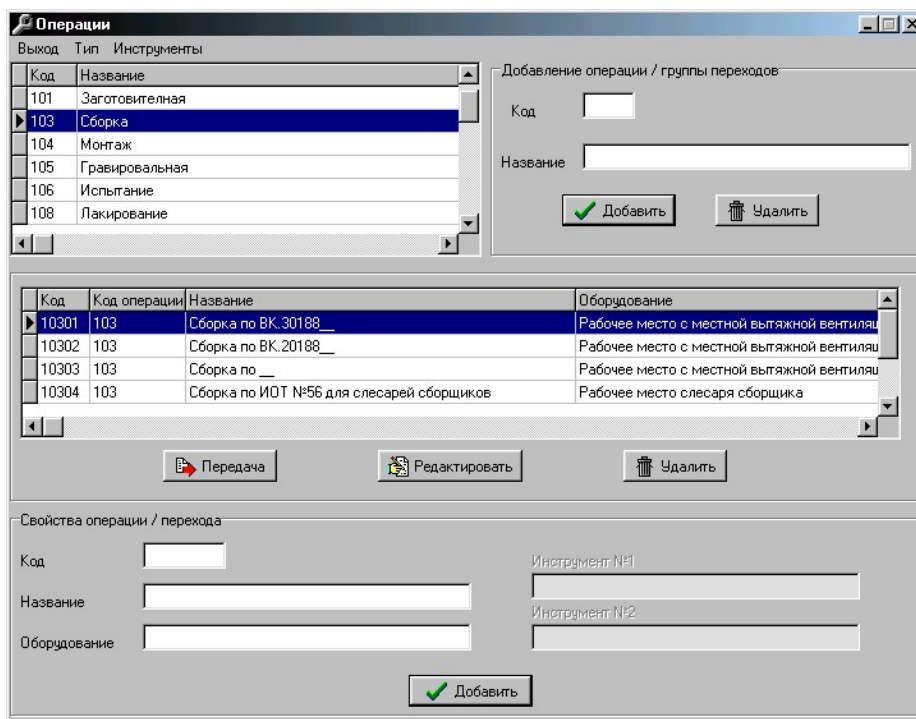


Рис. 9.16. Інтерфейс програми ENGINE при роботі з операціями.

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 додати 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 „Редактировать”), або додана в якості нового запису. Активація кнопки „Удалить” призводить до вилучення виділеного запису з бази даних.

Для заповнення бази даних переходів необхідно активізувати пункт меню „Тип” і обрати в підменю „Переходы” (рис. 9.17).

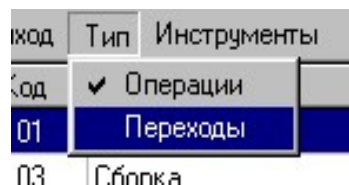


Рис. 9.17. Відображення пункту зміни режиму для роботи з базою переходів.

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. 9.18).

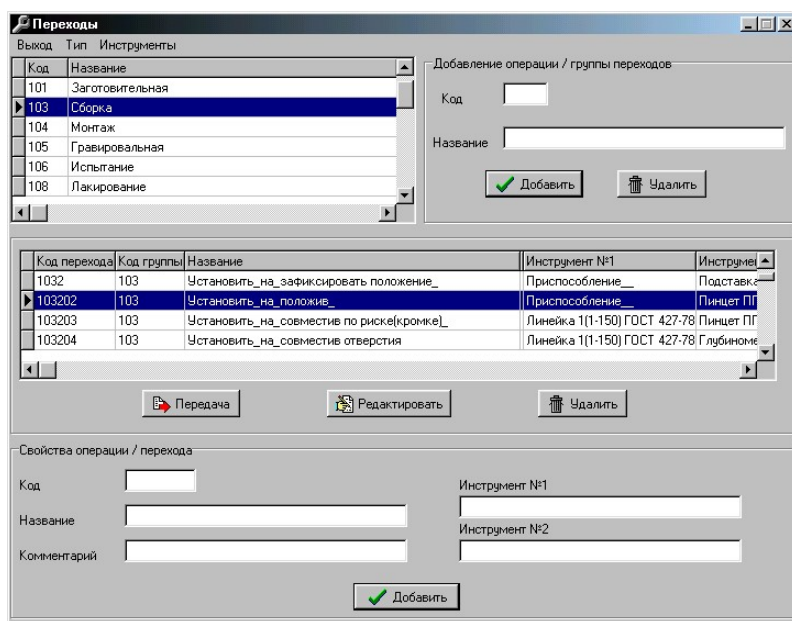


Рис. 9.18. Интерфейс работы с записами переходов.

Для доступа до базы инструментов та пристосувань необходимо выбрать пункт меню „Инструменты”. После этого з’явиться вікно управління базою даних інструментів (рис. 9.19).

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 „Инструменты”, натиснувши кнопку у верхньому правому куті з зображенням „X”. Після цього буде активовано попереднє вікно. Для завершення роботи з програмою ENGINE треба вибрати пункт меню „Выход” та підтвердити намір виходу з програми.

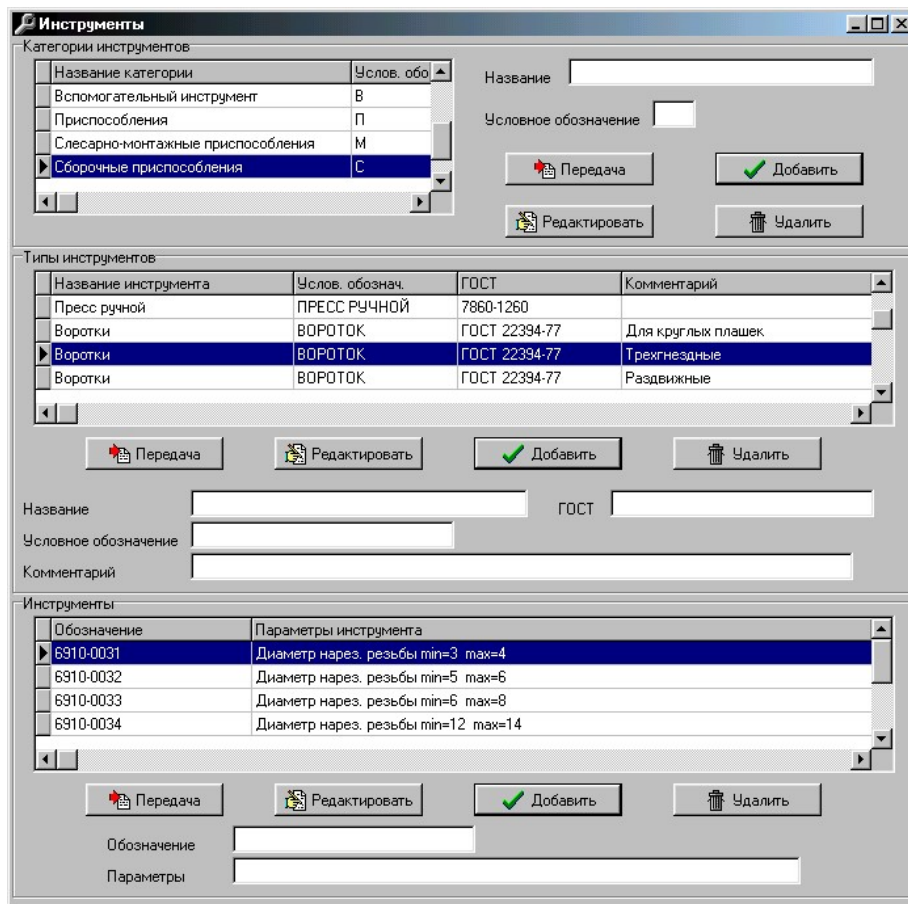


Рис. 9.19. Вікно роботи з базою інструментів.

Робота проектувальника в системі АСПТ МСР „ТехноМастер”.
Після запуску програми TMASTER.EXE відкривається головне меню системи (рис.9.20).

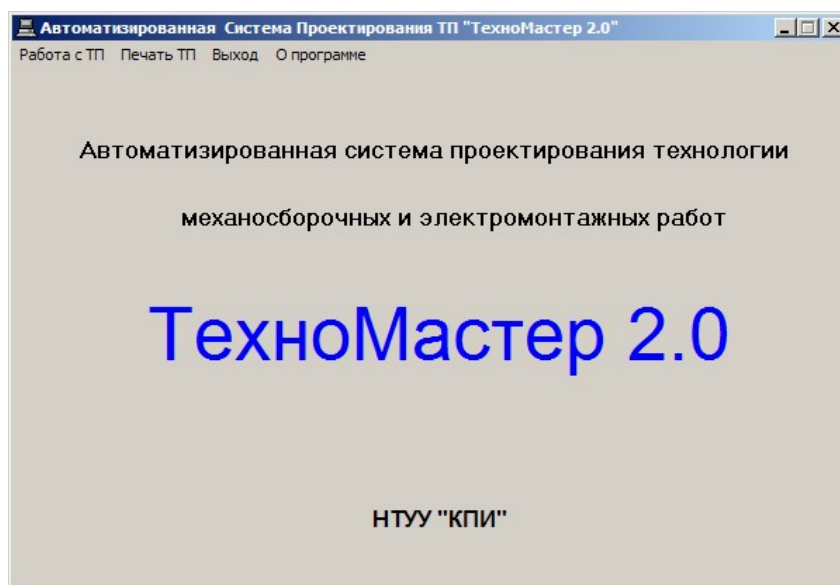


Рис. 9.20. Вікно системи „ТехноМастер”.

Послідовність дій з проектування технологічних процесів механоскладальних та електромонтажних робіт та відповідні вікна системи наведено в додатку Н.

9.4.7 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 [9.42]. 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 „ТехноМастер”.

На початку процесу проектування завантажуються системи SolidWorks та „ТехноМастер”. При цьому з’являються головні вікна вказаних систем.

З метою створення нового файлу складання в системі SolidWorks виконується наступна послідовність дій : „Файл → Создать → Сборка”. 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 „Вставка → Автокрепежи”. Для видалення компонент з моделі виробу, треба натиснути правою кнопкою миші на назві компонента у дереві проектування, та, у вікні, яке з’явилося обирати пункт „Удалить”. В дереві конструювання біля назви компонентів може бути присутнє позначення (префікс), яке є інформацією 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 причини необхідно завжди бути обережним при зберіганні або перейменуванні документу компоненти, а також при переміщенні 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.

Висновки до розділу

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 „ТехноМастер” 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 ЕОМ, має інтуїтивний інтерфейс, тому з легкістю може бути опанована рядовим користувачем комп'ютера без спеціальної підготовки.

Перелік посилань до розділу 9

- 9.1. Гонсалес-Сабатер А. Содержание задачи автоматизации процесса проектирования технологии сборки изделий машиностроения. Сборка в машиностроении, приборостроении. № 10, 2001. – С. 12–14.
- 9.2. Гонсалес-Сабатер А. Содержание задачи автоматизации процесса проектирования технологии сборки изделия машиностроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. №11, 2001. – С. 14–18.
- 9.3. Гонсалес-Сабатер А. Построение математической модели для автоматизированного решения задач проектирования технологии сборки изделий машиностроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. №1, 2002. – С. 9–13.
- 9.4. Гонсалес-Сабатер А. Построение математической модели для автоматизированного решения задач проектирования технологии сборки изделий машиностроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. №2, 2002. – С. 15–18.
- 9.5. Гонсалес-Сабатер А. Методические основы автоматизации решения задач проектирования технологии сборки. Сборка в машиностроении, приборостроении. № 5, 2002. – С. 3–10.
- 9.6. Сімута Р.Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: Дис. к.т.н: 05.02.08. – К., 2003. – 176 с.
- 9.7. Григор'єва Н., Шабайкович В. Моделювання автоматичного складання виробів за допомогою графів. //Технічні вісті № 1, 2003. – С. 23–26.
- 9.8. Шабайкович В. Проблеми віртуального автоматичного складання. //Машинознавство. № 7, 2002. – С. 40–42.
- 9.9. Кореньков В. М. Автоматизований синтез маршрутних технологічних процесів складання: Дис. к.т.н: 05.02.08. – К., 2005. – 171 с.
- 9.10. Давигора В.М., Кореньков В.М. Формальні процедури розробки послідовності складання виробів // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. Матеріалознавство та машинобудування. – 2002. – № 6. – С. 59–68.
- 9.11. Сімута Р.Р. Визначення бінарних відношень обмеження рухливості деталей складальної одиниці в напрямках, які не є колінеарними щодо головної системи координат // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. Матеріалознавство та машинобудування. – 2002. – № 6. – С. 89–93.
- 9.12. Давигора В.М., Пасічник В.А., Сімута Р.Р. Спосіб визначення взаємних обмежень рухливості деталей у складальній одиниці // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2000. – №3, ч. 2. – С. 157-161.
- 9.13. Давигора В.М. Методика автоматизованого синтезу раціональних порядків складання // Technologia I automatizacja montazu. – Warszawa: OBR TEKOMA. –2001. – №2. – С. 3–10.
- 9.14. Давигора В.М. „Зворотний” синтез технологічно доцільних порядків послідовно-паралельного складання // Вісник ЖІТІ. Технічні науки. – 2000. –№12. – С. 100–111.
- 9.15. Давигора В.Н., Пасечник В.А. Теория автоматизированного синтеза исходного множества альтернатив доминирующих порядков

последовательно-параллельной сборки // Вестник НТУУ „Киевский политехнический институт”. Машиностроение. – 2000. – № 39. – С. 55–57.

9.16. Автоматизированное проектирование технологии и нормирование сборочных работ на машиностроительных предприятиях мелкосерийного производства: Метод. рекомендации / НИИ труда. – М.: НИИтруда, 1985. – 77 с.

9.17. Кормильцев В.А. Математическая модель собираемого изделия. Вестник машиностроения №7, 1991.

9.18. Сборка и монтаж изделий машиностроения: Справочник. В 2-х т. – М.: Машиностроение. 1983. Т. 1. – 480 с.

9.19. Основи технології складання приладів: Підручник/ В.О.Румбешта. – К.: ІСДО. 1993. – 303 с.

9.20. Кореньков В.М., Пасічник В.А., Смута Р.Р. Аналіз з'єднань, що забезпечують нероз'ємність складальних одиниць та виробів і деякі способи визначення таких з'єднань. // Вісник Технологічного університету Поділля, 2002.

9.21. Филин В.К. Структурно-символьный метод представления конструкций изделий для проектирования технологических процессов их производства в условиях ГПС. Автореф. к.т.н. 05.12.13. – Л.: 1985. – 18 с.

9.22. Потапов В.И. Организационно-техническое проектирование. САПР. – К.: Техника, 1990. – 247 с.

9.23. Первушин Н.Н. Разработка математической модели изделия нормальной точности для автоматизированного проектирования групповых технологических процессов сборки: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – М.:, 1991. – 16 с.

9.24. Максимович Б.Д. Автоматизация проектирования технологических процессов автоматической сборки // Машиностроитель. – 1999. – №9.

9.25. Зайчиков И.В. Методы и средства обработки визуальной информации при автоматизации технологических процессов сборки: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Тула:, 1995. – 22 с.

9.26. Непомилуев В.В. Технология виртуальной сборки – способ индивидуального подбора деталей. //Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 1. – С. 31–35.

9.27. Торпачев А.В. Методика создания и применения технологических баз знаний при проектировании процессов механообработки и узловой сборки: Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – М.:, 2000. – 20 с.

9.28. Шабайкович В. Проблеми віртуального автоматичного складання. // Машинознавство, 2002, №7 (61). – С. 40-42.

9.29. Григорєва Н., Шабайкович В. Моделювання автоматичного складання виробів за допомогою графів. // Технічні вісті, 2003/1(16), 2(17). – С. 23-26.

9.30. Колчин А.Ф., Овсянников М.В., Стрекалов А.Ф., Сумароков С.В. Управление жизненным циклом продукции. – М.: Анахарсис, 2002. – 304 с.

9.31. Гамаюн І.П. Моделі та методи інформаційної технології адаптивного синтезу оптимальної технологічної схеми складання: Автореф.

дис. д-ра техн. наук: 05.13.06 / Національний технічний ун-т "Харківський політехнічний ін-т". – Харків, 2005. – 36 с.

9.32. Павлов В.А. Методы базирования и сборки летательных аппаратов. – М.: МАТИ, 1968. – 156 с.

9.33. Безъязычный В. Ф., Семенов А.Н. Научные и методические основы сборки. Состояние теории. //Сборка в машиностроении, приборостроении. № 4, 2004. – С. 3–7.

9.34. Філіппова М.В. Методи та засоби автоматизованого проектування технології складання вісесиметричних складальних одиниць оптико-механічних приладів: Дис. канд. техн. наук : спец. 05.11.14 – Технологія приладобудування. – К.: НУТУ „КПІ”, 2007. – 194 с.

9.35. Проектирование технологий: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов/ Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.

9.36. Капустин Н.М. Кузнецов П.М., Схиртладзе А.Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении. – М.: Высшая школа, 2004. – 416 с.

9.37. Філіппова М.В., Вислоух С.П. Інформаційні основи проектування технології механоскладальних робіт. // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Приладобудування. – 2004. – Вип. 28. – С. 139–144.

9.38. Вислоух С.П., Филиппова М.В. Формирование технологических процессов механосборочных работ в САПР ТП. // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении. Материалы 5-го Международного научно-технического семинара. – Киев, АТМ Украины, 2005. – С. 167–169.

9.39. Вислоух С.П., Філіппова М.В. Формалізація опису складальних одиниць в приладобудуванні. // Вісник СевДТУ. Вип.. 72: Автоматизація процесів та управління: Зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевДТУ, 2006. – С. 103–108.

9.40. Антонюк В.С., Вислоух С.П., Филиппова М.В. Автоматизированное проектирование технологических процессов сборки изделий приборостроения. / Сборка в машиностроении, приборостроении. М.: Машиностроение, 2007, № 6. – С. 3-6.

9.41. Філіппова М.В., Вислоух С.П. Методика автоматизованого проектування технології складання виробів приладобудування // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. Наук. Праць ЖДТУ. – 2006. – Вип. 4. – С. 18-30.

9.42. Філіппова М.В., Вислоух С.П. Комплексне конструювання оптико-механічних виробів та автоматизоване проектування технологічних процесів їх складання / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Вип. 20. – Краматорськ. – 2006. – С. 200-207.

9.43. Автоматизированная система проектирования технологических процессов механосборочного производства. / Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1979. – 247 с.

9.44. Капустин Н.М., Павлов В.В., Козлов Л.А. и др. Диалоговое проектирование технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1983. – 255 с.

9.45. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2-х т. Т.1 Организация группового производства. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 407 с.

9.46. Корсаков В.С., Капустин Н.М., Темпельгоф К.-Х., Лихтенберг Х. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении. /Под общ. ред. Н. М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1985. – 304 с.

9.47. Wang Hai. Разработка технологических процессов с использованием теории графов. / Jixie zhizao Machinery. 1995, № 9. – С. 23–25 (кит.).

9.48. Горанский Г. К., Губич Л. В., Махнач В. И. и др. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / НАН Беларуси; Институт технической кибернетики / Под ред. А.Г. Раковича. – Минск, 1997. – 276 с.

9.49. Челищев Б.Е. и др. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении /Б.Е. Челищев, И.В. Боброва, А. Гонсалес – Сабатер; Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.

9.50. Капустин Н.М., Васильев Г.Н. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования / Под ред. И.П. Норенкова. Кн. 6. – М.: Высшая школа, 1988. – 189 с.

9.51. Свідोцтво на реєстрацію авторського права на твір № 34020. Комп'ютерна програма «Автоматизована система проектування технології механоскладальних і електромонтажних робіт «ТехноМастер». / Вислоух С.П., Волошко О.В. Заявка від 7.05.2010, дата реєстрації 07.07.2010.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання досліджень вирішена важлива науково-технічна проблема, що має велике народногосподарське значення і полягає в підвищенні ефективності технологічної підготовки виробництва на основі використання можливостей методів багатовимірного статистичного аналізу, методів математичного та імітаційного моделювання й оптимізації, що забезпечують якісне розв'язання різноманітних задач технологічного проектування. На основі виконаних досліджень зроблено наступні наукові висновки та практичні рекомендації:

1. Вперше на системному рівні запропонована концепція використання інформаційних технологій для розв'язання задач технологічного проектування, яка полягає в виборі таких методів моделювання та оптимізації, що дозволяють з найбільшою ефективністю розв'язати будь-яку технологічну задачу та скоротити строки технологічної підготовки виробництва та підвищити її якість.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано можливості підвищення інформативності початкової інформації при розв'язанні задач технологічного проектування шляхом використання методів багатовимірного статистичного аналізу, що дозволяє знизити розмірність початкових масивів інформації, спростити вирішення технологічних задач та підвищити точність їх результатів.

3. Запропоновано та обґрунтовано використання методів кластерного та дискримінантного аналізу для класифікації, групування та розпізнавання образів при розв'язанні задач технологічної підготовки виробництва. Наведено результати кластеризації конструкційних матеріалів, дискримінантні та класифікаційні функції, що дозволяють обґрунтовано підійти до дослідження нових конструкційних та інструментальних матеріалів та розробки нормативів з режимів різання. Запропоновано систему автоматизованого проектування технології обробки корпусних деталей, що використовує методику класифікації та розпізнавання образів, яка дозволяє достатньо просто розв'язати поставлену задачу – отримати необхідний технологічний процес виготовлення деталі.

4. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання новітніх евристичних та нейромережевих методів для розв'язання задач моделювання, прогнозування, класифікації та розпізнавання образів при технологічному проектуванні. Розроблено методики застосування вказаних методів, розроблено їх алгоритми та відповідні програми, а також здійснено їх практичну апробацію, яка показала ефективність їх використання.

5. Запропоновано та обґрунтовано ефективність використання чисельних методів параметричного моделювання, визначено доцільність їх застосування при розв'язанні різноманітних технологічних задач. Розроблено алгоритми та програми сучасних методів чисельного моделювання та виконано їх практичну апробацію. Використання сучасних методів параметричного моделювання дозволяє отримати адекватні математичні моделі, які можна застосовувати при технологічній

підготовці виробництва.

6. Запропоновано та обґрунтовано використання методів нелінійного та стохастичного програмування для розв'язання оптимізаційних технологічних задач, в тому числі і задач багатокритеріальної оптимізації. Наведено алгоритми та відповідні програми, що реалізують вказані методи, практичне використання цих методів показало їх ефективність та переваги перед традиційними методами оптимізації.

7. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання методів математичного та імітаційного моделювання для оптимізації завантаження технологічних виробничих систем. Наведено алгоритми та програми методів багатозначної логіки та порядкових визначників і мереж Петрі. Практична їх апробація показала, що за допомогою цих методів можна зменшити час обробки деталей та складання виробів в 1,7...2 рази.

8. Запропоновано та обґрунтовано використання методів математичного моделювання та оптимізації для визначення відносної та реальної оброблюваності матеріалів різанням, створено відповідну автоматизовану систему, що дозволяє визначити відносну оброблюваність конструкційного матеріалу за вибраним матеріалом-аналогом з врахуванням конкретних умов обробки як за частковими, так і за комплексним показниками, а також визначити реальну оброблюваність матеріалу (виконати оптимізацію процесу обробки) за вибраним критерієм оптимальності. Розроблена система може також використовуватись для визначення оброблювальних властивостей інструментальних матеріалів.

9. Запропоновано та обґрунтовано використання методів інформаційних технологій при проектуванні технологічних процесів механоскладальних та електромонтажних робіт в приладобудуванні. Наведено методику, алгоритми та програми автоматизації проектування вказаних робіт та практичну апробацію, яка показала, що їх використання дозволяє підвищити продуктивність праці проектувальників в 1,5...2 рази та покращити якість результатів проектування в 1,2...1,5 рази.

10. Висока ефективність результатів проведених досліджень і рівень запропонованих інформаційних технологій при розв'язанні задач технологічного проектування, які забезпечують підвищення якості технологічної підготовки виробництва та зменшення строків їх виконання, підтверджуються впровадженнями на ряді підприємств різних галузей промисловості.

Результати даної роботи впроваджено в навчальний процес при формуванні навчальних програм для підготовки спеціалістів з приладобудування в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» та, у відповідності до положень Дослідницького університету НТУУ «КПІ», результати роботи впроваджені у процес підготовки магістерських дисертацій, проведення наукової роботи магістрами та при реалізації безперервного процесу підготовки магістра – кандидата наук.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Значення факторів та головних компонент, що дозволяють знизити розмірність масивів початкової інформації без зниження їх інформативності

Таблиця А.1.

Значення факторів вуглецевих якісних конструкційних сталей

№ п/п	Найменування матеріалу	Фактори	
		f_1	f_2
1	Сталь 05kp	-1,70199	0,42971
2	Сталь 08kp	-1,44256	-0,44672
3	Сталь 08nc	-1,27453	0,22307
4	Сталь 08	-0,99265	-0,17031
5	Сталь 10kp	-0,81793	-2,79652
6	Сталь 10nc	-0,66129	-2,12092
7	Сталь 10	-1,35085	1,09442
8	Сталь 15kp	-1,02706	-0,14910
9	Сталь 15nc	-0,95474	0,73010
10	Сталь 15	-0,77711	0,79988
11	Сталь 20kp	-0,65551	-0,61676
12	Сталь 20nc	-0,58318	0,26244
13	Сталь 20	-0,40555	0,33222
14	Сталь 25	-0,30158	1,41317
15	Сталь 30	0,15387	0,90657
16	Сталь 35	-0,18638	0,75128
17	Сталь 40	0,17299	-0,48691
18	Сталь 45	0,19041	0,97265
19	Сталь 50	0,52611	0,75009
20	Сталь 55	0,33210	0,82099
21	Сталь 58	0,70841	-1,58740
22	Сталь 60	0,78985	-0,23440
23	Сталь 65	0,91006	0,46687
24	Сталь 70	1,11363	-0,40497
25	Сталь 75	1,48575	-1,08269
26	Сталь 80	1,58480	-0,79761
27	Сталь 85	1,66638	-2,42291
28	Сталь 60Г	0,73436	1,28045
29	Сталь 65Г	1,08379	1,83002
30	Сталь 70Г	1,68039	0,25328

Таблиця А.2.

Значення факторів низьколегованих конструкційних сталей

№ п/п	Найменування матеріалу	Фактори			
		f_1	f_2	f_3	f_4
1	09Г2	-0,72137	-1,14101	-1,23979	-2,32867
2	09Г2д	-0,57419	-1,07493	-1,15878	-1,43698
3	14Г2	-0,01291	-0,74048	-0,85758	1,22118
4	9Г2С	-0,02957	-0,63604	0,17768	-0,67062
5	10Г2С1	-0,43112	-0,83883	2,05318	-0,67062
6	15ГФ	0,39000	0,15748	-0,98212	-0,96475
7	15Г2СФ	1,12048	0,22216	1,14724	1,31987
8	10Г2Б	0,04266	-0,46767	-0,73889	-1,25012
9	10ХСНд	-1,79568	2,36755	1,26412	-2,28512
10	15ХСНд	-0,85770	1,30319	-0,30702	3,81816
11	10ХНдп	-1,54213	1,46453	-1,47564	-0,17413
12	12ГС	-0,63452	-0,93754	0,93215	1,57231
13	16ГС	-0,67574	-0,90134	0,49604	0,39354
14	17ГС	-0,48299	-0,78296	0,47051	-1,43269
15	17Г1С	0,75589	-0,34767	0,34331	3,37365
16	14Г2АФ	0,67173	0,15676	1,41477	0,23501
17	16Г2АФд	1,38089	0,75171	1,10127	-1,51970
18	18Г2АФпс	2,13414	1,11307	-1,36240	-0,50377
19	14ХГС	-0,35546	-0,37454	-0,37301	-0,20597
20	15Г2АФдпс	1,61758	0,70656	-0,90504	1,50340

Таблиця А.3.

Значення головних компонент легованих конструкційних сталей

№ п/п	Наймену- вання матеріалу	Головні компоненти				
		1	2	3	4	5
1	15Х	-0,68063	0,36647	-0,33403	0,26967	-0,28315
2	15ХА	-0,67740	0,38253	-0,36850	0,26499	-0,30435
3	20Х	-0,63870	-0,37420	-0,04305	-0,05195	-0,10296
4	30Х	-0,44789	-0,16215	-0,04456	0,36853	0,16546
5	30ХРА	0,53251	-1,77343	-0,22601	0,10852	0,52108
6	35Х	-0,36888	-0,37972	0,14474	0,36312	0,35699
7	38ХА	-0,20400	0,14352	-0,09059	0,73000	0,53817
8	40Х	-0,30680	-0,74439	0,30730	0,29701	0,44850
9	45Х	-0,25874	-1,09495	0,47879	0,23171	0,53549
10	50Х	-0,31734	-1,65185	0,89306	-0,00457	0,62448

Продовження таблиці А.3

11	15Г	-2,08872	1,61901	-0,24669	0,45584	-0,82801
12	20Г	-1,82598	1,72878	-0,16995	0,38729	-0,37891
13	25Г	-1,71603	1,48464	-0,03462	0,33489	-0,19901
14	30Г	-1,71075	0,83844	0,34074	0,01665	-0,08452
15	35Г	-1,73777	0,53403	0,53997	-0,09554	-0,03326
16	40Г	-1,65137	0,15519	0,69978	-0,15572	0,07460
17	45Г	-1,66010	-0,47690	1,08406	-0,47317	0,18457
18	50Г	-1,60855	-0,86498	1,28388	-0,57490	0,29555
19	10Г2	-2,22304	1,14692	-0,61186	-0,18156	-0,59829
20	30Г2	-1,95994	-0,05932	-0,07136	-0,67893	0,09888
21	35Г2	-1,91406	-0,52436	0,21842	-0,95132	0,25430
22	40Г2	-1,84404	-0,69870	0,34316	-0,96834	0,39480
23	45Г2	-1,78102	-0,86600	0,47236	-0,98497	0,53304
24	50Г2	-1,81388	-1,26980	0,86990	-1,16868	0,69901
25	18ХГ	-0,57282	-0,67858	-0,39534	-0,14011	0,05065
26	18ХГТ	0,03429	-0,25602	-2,84328	0,84913	1,80639
27	20ХГР	-0,11493	-0,03336	-0,86549	0,29566	0,22050
28	27ХГР	0,25531	-1,22851	-0,58263	-0,01261	0,48697
29	25ХГТ	0,42030	-0,92345	-2,83439	0,85986	2,03429
30	30ХГТ	0,42495	-1,81761	-2,31582	0,37442	2,16235
31	40ХГТР	-0,29004	-0,65229	-1,74662	0,70752	2,17779
32	35ХГФ	-0,24397	0,37363	0,09484	0,62688	1,26247
33	25ХГМ	0,28088	-0,42080	-0,14509	0,18751	0,95710
34	33ХС	-0,02194	-0,27872	-0,09458	1,91721	-1,53362
35	38ХС	0,02613	-0,62928	0,07690	1,85190	-1,44663
36	40ХС	0,19361	-2,25304	0,57672	1,42180	-1,73565
37	15ХМ	-0,54186	2,88154	0,33047	1,32091	0,50483
38	20ХМ	-0,15039	0,88407	-0,04454	0,66862	0,40334
39	30ХМ	-0,03387	0,07811	0,40971	0,41318	0,65420
40	30ХМА	0,04110	0,55897	0,12017	0,70932	0,66126
41	35ХМ	-0,02159	-0,02505	0,61096	0,48749	0,79949
42	38ХМ	0,18383	-0,28388	0,79997	0,58482	0,89883
43	30Х3МФ	1,19540	0,91903	0,64118	2,01787	1,76516
44	40ХМФА	0,37810	0,60289	1,53535	0,53294	2,19611
45	15ХФ	0,02360	0,95105	0,05047	-0,10788	-0,10812
46	40ХФА	0,41794	0,31422	0,95894	-0,23023	1,09884
47	15Н2М	0,20489	1,07472	-0,15957	-1,12986	-0,69053
48	20Н2М	0,29790	0,84304	0,02081	-1,13607	-0,49449
49	20ХН	-0,14157	0,89034	-0,42236	-0,43332	-0,98612

Продовження таблиці А.3.

50	40XH	0,04254	-0,31553	0,31303	-0,76109	-0,38956
51	45XH	0,14200	-0,51509	0,42448	-0,77666	-0,23592
52	50XH	0,07517	-1,27672	0,87492	-1,10273	-0,19539
53	20XHP	0,65714	0,17780	-0,96327	-0,25677	-0,48667
54	12XH2	0,20211	1,11910	-0,71409	-0,50035	-1,11682
55	12XH3A	0,66369	1,28344	-1,03929	-0,75683	-1,23050
56	20XH3A	0,73493	1,48043	-0,87446	-0,57678	-0,92763
57	30XH3A	0,64696	0,44984	-0,25001	-0,97392	-0,85074
58	12X2H4A	1,34836	0,68736	-1,01575	-0,58773	-1,08578
59	20X2H4A	1,47132	-0,08649	-0,63042	-0,85253	-0,87733
60	20XГСА	-0,30424	-0,35974	-0,46087	0,27284	-2,15717
61	25XГСА	0,01082	-1,29130	-0,24994	-0,04429	-1,92091
62	30XГС	-0,02533	-1,37012	-0,13757	0,12489	-1,89265
63	30XГСА	0,00359	-1,27856	-0,20204	0,14507	-1,88053
64	35XГСА	0,77160	-2,60977	-0,15900	0,25120	-1,84399
65	30XГCH2A	1,04060	-1,82894	-0,76905	-0,36690	-1,63069
66	15XГH2TA	0,45307	0,91433	-3,14504	0,01303	0,74554
67	20XГHP	0,70892	0,01991	-1,08767	-0,38252	-0,41095
68	20XГHTP	0,38752	-0,30069	-2,90003	-0,25260	1,10288
69	38XГH	-0,25119	0,26276	0,09472	-0,54699	-0,17164
70	14X2H3MA	1,29635	0,57085	-0,03890	-0,61663	-0,63152
71	20XH2M	0,40029	0,93265	-0,04955	-0,90888	-0,56506
72	30XH2MA	0,48955	0,29445	0,52890	-0,93243	-0,18790
73	38X2H2MA	1,13596	0,36191	0,55357	0,28750	0,02152
74	40XH2MA	0,59351	0,20810	0,43457	-0,44778	0,04972
75	40X2H2MA	1,08655	-0,06327	0,74518	-0,10007	0,13437
76	38XH3MA	1,18728	0,52291	0,54268	-0,63199	-0,22879
77	18X2H4MA	1,67541	1,34812	-0,06044	-0,71242	-0,53557
78	25X2H4MA	1,61763	0,72959	0,46325	-0,96762	-0,36925
79	30XH2MΦA	0,91950	0,46427	1,70107	-1,50235	1,00075
80	36X2H2MΦ	1,60346	0,35652	1,41715	-0,09867	1,30626
81	38XH3MΦA	1,89487	0,67429	1,70692	-0,88635	1,24172
82	45XH2MΦA	1,32853	-1,80259	2,21090	-1,73520	1,54249
83	20XH4ΦA	1,08034	1,39265	0,43414	-1,39051	0,06321
84	38X2V	0,68816	-0,08393	1,34682	3,55204	-0,78458
85	38X2MVA	0,88090	0,58161	1,74337	4,84750	-0,65877

Таблиця А.4.

Значення головних компонент інструментальних твердих сплавів

№ п/п	Найменування матеріалу	Головні компоненти	
		1	2
1	BK3	0,70445	-1,59997
2	BK3M	0,70445	-1,59997
3	BK4	0,80807	-1,01775
4	BK4B	0,80807	-1,01775
5	BK6	0,73804	-0,60590
6	BK6M	0,68128	-0,83999
7	BK6OM	0,39268	-1,02295
8	BK6B	0,76576	-0,53064
9	BK8	0,66801	-0,19406
10	BK8B	0,75119	0,03172
11	BK8BK	0,75119	0,03172
12	BK10	0,57026	0,14252
13	BK10M	0,48708	-0,08326
14	BK10OM	0,25263	-0,19926
15	BK10KC	0,62571	0,29304
16	BK11B	0,56428	0,50727
17	BK11BK	0,48503	0,53220
18	BK15	0,33974	1,02160
19	BK20	0,13564	1,89238
20	BK20KC	0,19109	2,04290
21	BK20K	-0,08617	1,29029
22	BK25	-0,15033	2,62094
23	T30K4	-3,53155	-0,76990
24	T15K5	-1,68600	-0,61196
25	T14K8	-1,61441	-0,23262
26	T5K10	-0,46102	-0,13619
27	T5K12	-0,23690	0,55804
28	TTK12	-0,46945	0,61055
29	TT8K6	-0,73896	-0,67936
30	TT10K8B	-0,65537	-0,39407
31	TT20K9	-1,79446	-0,03953

ДОДАТОК Б

Значення коефіцієнтів класифікаційних функцій, що отримані методом дискримінантного аналізу

Таблиця Б.1.

**Коефіцієнти класифікаційних функцій інструментальних сталей
(високолегованих, нетеплостійких високої твердості та напівтеплостійких високої твердості)**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти класифікаційних функцій		
		Група 1	Група 2	Група 3
1	<i>C</i>	92,678	33,275	34,418
2	<i>Si</i>	-1,679	35,962	10,725
3	<i>Cr</i>	10,078	6,602	-0,717
4	<i>V</i>	24,524	4,000	-11,903
5	<i>Vb</i>	-105,464	-48,967	22,781
6	<i>Mo</i>	31,690	7,887	-14,734
7	<i>W</i>	15,669	2,915	-6,158
8	<i>Co</i>	-2,789	-0,08286	5,529
9	<i>WC</i>	-3,668	-0,109	16,434
10	<i>Tac</i>	-3,094	-0,09191	17,129
11	<i>R_{p0,2}</i>	0,161	0,004797	0,647
12	Густина	16,998	0,505	-71,442
13	Константа	-221,743	-44,463	-295,012

Таблиця Б.2.

**Коефіцієнти класифікаційних функцій інструментальних матеріалів
(теплостійких і швидкорізальних сталей та твердих сплавів)**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти класифікаційних функцій		
		Група 1	Група 2	Група 3
1	<i>C</i>	21,936	20,387	19,971
2	<i>Mn</i>	31,688	8,454	10,920
3	<i>Si</i>	29,077	17,652	17,844
4	<i>P</i>	-27271,421	-4554,883	-5459,735
5	<i>S</i>	38800,749	4930,180	6060,001
6	<i>Cr</i>	-0,389	-0,745	0,126
7	<i>Ni</i>	16,634	4,369	6,011
8	<i>Cu</i>	28,772	11,339	14,070
9	<i>V</i>	0,937	-2,114	-0,414
10	<i>Ti</i>	-53,723	-4,983	-12,146
11	<i>Mo</i>	-3,361	1,113	3,537
12	<i>W</i>	0,901	0,01742	0,709
13	<i>R_m</i>	-4,501	-0,165	-0,166
14	<i>A</i>	15,745	0,947	1,370
15	<i>Z</i>	-3,753	-0,865	-1,077
16	<i>R_{eH}</i>	-37,225	0,733	-0,218
17	<i>R_{p0,2}</i>	8,494	0,310	0,387
18	<i>HB</i>	-0,05724	0,0000825	-0,00123
19	Константа	-291,068	-17,585	-22,415

Таблиця Б.3.

**Коефіцієнти класифікаційних функцій корозійностійких матеріалів
(пружинних, корозійностійких сталей і сплавів, високоміцних
хромонікелевих сталей аустенітно-мартенситного класів, корозійностійких
сталей феритно-аустенітного класів)**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти класифікаційних функцій				
		Група 1	Група 2	Група 3	Група 4	Група 5
1	<i>C</i>	31.123	48.927	42.766	44.984	21.735
2	<i>Mn</i>	-2.036	-2.263	3.071	4.996	9.768
3	<i>Si</i>	1.128	3.925	2.260	-0.206	0.06572
4	<i>P</i>	5702.022	5708.796	4008.577	5654.925	3574.721
5	<i>S</i>	-2916.58	-2899.75	-1911.81	-2828.20	-1850.83
6	<i>Cr</i>	-0.132	-0.552	6.006	6.492	10.412
7	<i>Ni</i>	-0.675	-1.685	2.387	7.547	11.031
8	<i>Cu</i>	23.852	16.690	8.598	4.765	14.564
9	<i>V</i>	59.870	81.927	51.650	60.891	40.582
10	<i>Nb</i>	71.148	96.573	-30.302	-140.077	-219.510
11	<i>Al</i>	27.636	28.051	22.970	38.484	10.122
12	<i>Ti</i>	0.200	3.945	6.576	-14.488	-0.809
13	<i>Mo</i>	7.523	6.820	5.567	16.206	10.207
14	<i>W</i>	5.218	2.490	8.378	15.942	16.201
15	<i>R_m</i>	-0.921	-1.198	-0.513	-1.240	0.008996
16	<i>A</i>	-0.511	-0.723	-0.968	-0.678	-2.257
17	<i>Z</i>	0.412	0.670	0.358	0.596	-0.108
18	<i>R_{eH}</i>	2.098	0.893	6.162	6.133	10.740
19	<i>R_{p0,2}</i>	1.078	1.511	0.566	1.425	-0.578
20	<i>HB</i>	0.132	0.1042	-0.01963	-0.00757	0.08557
21	Константа	-82.616	-79.185	-112.252	-189.528	-207.996

Таблиця Б.4.

**Коефіцієнти класифікаційних функцій сплавів на основі міді та нікелю
(мідно-нікелевих сплавів, нікелю та його сплавів і жароміцних мідних сплавів)**

№ п.п.	Найменування параметру	Коефіцієнти класифікаційних функцій		
		Група 1	Група 2	Група 3
1	<i>C</i>	42,144	70,300	-0,134
2	<i>Mn</i>	7,456	0,419	0,01001
3	<i>Si</i>	-43,245	-11,803	-0,876
4	<i>P</i>	7850,938	25604,155	-193,978
5	<i>S</i>	87,050	258,285	-1,530
6	<i>Cr</i>	2,953	1,931	0,02168
7	<i>Ni</i>	0,05579	-0,001547	0,01545
8	<i>Cu</i>	-4,886	1,081	-0,05174
9	<i>Al</i>	51,509	9,895	0,0521
10	<i>Ti</i>	490,108	56,408	2,704
11	<i>Pb</i>	131,023	-31,115	4,231
12	<i>Co</i>	49,365	5,078	1,148
13	<i>Sb</i>	-4106,056	-26074,493	-53,959
14	<i>Mg</i>	26,038	110,044	0,486
15	<i>Bi</i>	-5578,118	-12914,743	334,209
16	<i>Fe</i>	18,520	-4,623	-0,208
17	<i>As</i>	2981,178	13380,751	-96,861
18	<i>Cd</i>	-15,776	-4,174	4,812
19	<i>Zn</i>	783,096	2690,006	-18,110
20	<i>Be</i>	-269,151	-44,898	-6,401
21	<i>R_m</i>	-3,114	-0,05718	-0,03003
22	<i>A</i>	-0,239	0,314	0,07712

Продовження таблиці Б.4.

23	<i>НВ</i>	1,095	0,414	0,03781
24	<i>Е</i>	0,002593	0,0005983	-0,0000845
25	<i>Густина</i>	72,282	-2,752	-1,275
26	ρ	144,461	-13,433	-0,302
27	$t_{\text{правл}}$	-0,133	0,0702	-0,004678
28	<i>Теплопров.</i>	-190,932	-16,678	12,195
29	α	-4,081	0,137	0,243
30	$t_{\text{відж.}}$	-0,202	-0,08149	0,02255
31	Константа	-82,720	-11,524	-9,015

ДОДАТОК В

Аналіз пакетів програм, що реалізують штучні нейронні мережі

Останнім часом інтерес до штучних нейронних мереж значно зріс. Створено сотні програмних продуктів, що мають різні можливості, різну область застосування, та відповідно до цього – вартість ліцензії. Розглянемо основні програмні продукти, що належать до різних функціональних та цінових категорій.

Аналіз розповсюджених пакетів програм, що реалізують методики штучних нейронних мереж дозволяє зробити такі висновки.

1. Нейропакет Neural 10, що розроблений компанією Southern Scientific CC, South Africa, має досить обмежені можливості, реалізує лише одну нейромережеву парадигму – двохшарову нейронну мережу прямого розповсюдження. В програмі реалізований один алгоритм навчання – зворотного розповсюдження.

2. Пакет NeuroPro, що представлений інститутом обчислювального моделювання має набагато ширші можливості, ніж попередній. Пакет має можливість задавати кількість до 10 шарів та кількість нейронів в шарі – до 100. Але нейрони можуть бути тільки з нелінійною сигмоїдальною функцією активації, крутизна якої може задаватися для кожного шару окремо, є можливість встановлення точності навчання. Для навчання можна використовувати один з наступних методів: градієнтного спуску, модифікований PatTan метод, метод сполучених градієнтів. Тут нейронна мережа може мати декілька вхідних сигналів одночасно. Ця програма дозволяє вирішувати задачі прогнозування та класифікації. Перевагами пакету являються невеликі системні вимоги програми. Недоліками пакету є його обмежені можливості.

3. В пакеті QwikNet 32. реалізовано лише один тип нейромережі – багатошарова мережа прямого розповсюдження з кількістю прихованих шарів – до 5, та можливістю вибору одного з 6 алгоритмів навчання (модифікації методу зворотного розповсюдження). В пакеті реалізована можливість імпортування даних з популярного табличного процесору Microsoft Excel. Це спрощує введення даних та робить зручним аналіз даних з цієї програми. До переваг даного пакету також можна віднести графічне відображення процесів навчання. Недоліком цього пакету являється обмежена кількість видів нейронних мереж та способів їх навчання.

4. Програмна оболонка Neural Planer дозволяє моделювати нейронні мережі різноманітної конфігурації. В цьому пакеті реалізована робота в локальній мережі, він призначений для вирішення різноманітних задач класифікації об'єктів, обробки значень випадкових процесів, вирішення деяких математичних задач, створення ефективних експертних систем. В програмі реалізована функція автоматичного запису файлу з найкращим результатом навчання мережі та досить детальне регулювання параметрів навчання й створення мереж. До недоліків

можна віднести, що дані зберігаються в декількох файлах, що доставляє незручності при копіюванні.

5. Пакет BrainMaker призначений для моделювання багат шарових нейронних мереж з алгоритмом навчання зворотного розповсюдження. Він містить в собі програму підготовки та аналізу даних NetMaker та програму моделювання, навчання та запуску BrainMaker. Пакет орієнтовано на широке коло задач – від вирішення задач прогнозування, до систем розпізнавання образів. Програма оброблює вхідні дані нейронної мережі, виводить статистику її навчання та прогонки. В програмі є велика кількість контрольних функцій для оптимізації процесу навчання.

6. Програмний пакет Statistica Neural Network є універсальним пакетом нейромрежевого аналізу, що створений компанією StatSoft. В пакеті реалізовано багато видів нейронних мереж, є можливість створення складних комбінацій з мереж різних архітектур. Пакет включає в себе програму Automatic Network Designer, яка допомагає підібрати оптимальну архітектуру нейронної мережі для задачі, що вирішується. Пакет дає доволі широкі можливості візуалізації процесів навчання, графічного відображення архітектури мережі. Також до переваг цього програмного пакету відноситься підтримка стандарту передачі даних API, за допомогою якого ми можемо давати запити на обробку даних;

7. Програмний пакет MatLab містить багато можливостей, щодо створення та використання алгоритмів штучних нейронних мереж. Це пакети Neural Network Toolbox та Simulink, що працюють за допомогою внутрішньої мови опису даних пакету MatLab. Simulink дає можливість створювати унікальні системи керування процесами, що використовують алгоритми штучних нейронних мереж. Це єдина система, серед розповсюджених пакетів, що дозволяє розробляти подібні системи, які можуть керувати процесами в режимі “on line”. Внутрішня мова опису даних пакету Matlab, зокрема оператори опису штучних нейронних мереж, дає можливість моделювати практично будь-яку архітектуру нейронної мережі та алгоритм навчання, коригувати та налаштовувати параметри процесу навчання. Пакет дає можливість побудови різноманітних графіків, що відображають хід процесу навчання. Візуалізація процесу робить спостереження більш наглядним та дає можливість робити висновки про збіжність процесу навчання. Пакет дозволяє вирішувати найрізноманітніші задачі та будувати найскладніші системи.

8. Пакет NeuroSolutions v4.24 є розробкою NeuroDimension NeuroSolutions на основі зображення забезпечує найбільш могутнє і гнучке навколишнє середовище для створення штучних нейронних мереж. Інтуїтивність пакету має переваги перед іншими програмними продуктами, його інтерфейс дає можливість швидко і легко будувати і навчати нейронну мережу, щоб вирішити будь яку складну проблему. Пакет має потужний графічний призначений для користувача інтерфейс. За допомогою меню Tools і його підпункту NeuralBuilder можна вибрати тип мережі:

1) багатошарові перцептрони (MLP) - багатошарові мережі з типовим навчанням та із статичним зворотним розповсюдженням. Головна перевага мереж полягає в тому, що вони є зручними і що їх можна наблизити на будь-який вхід та вихід. Ключовими незручностями є те, що мережі навчаються поволі і вимагають великої кількості даних для навчання;

2) узагальнені MLP – мережі, в яких зв'язки дозволяють перестрибнути через один або більш шари. Теоретично MLP- мережі можуть розв'язати будь-яку проблему. Стандарт MLP вимагає багато часу для навчання і це залежить від кількості елементів мережі;

3) модульні MLP-мережі обробляють вхід, використовуючи декілька паралельних MLP-мереж, а потім повторно комбінують результати. Мережа має тенденцію створювати деяку структуру в межах топології, яка сприятиме спеціалізації функції в кожному підмодулі. На відміну від MLP, модульні мережі не мають повного взаємозв'язку між їх шарами. Тому меншу кількість вагів потрібно для самої мережі того ж розміру. Це прискорює навчання і зменшує кількість даних для навчання. Є багато способів сегментувати MLP в модулі. Але не відомо, як краще всього проектувати модульну топологію, основу на даних. Немає ніяких гарантій, що кожен модуль спеціалізує його навчання на унікальній частині даних;

4) Jordan і Elman мережі розширюють багатошаровий пресептрон з одиницями контексту, які обробляють елементи (PE), що пам'ятають минулу діяльність. Одиниці контексту забезпечують мережу здатністю витягнути тимчасову інформацію даних. У Elman мережі, діяльність перших прихованих елементів скопійована до одиниць контексту, тоді як Jordan мережа копіює результат мережі. Мережі, які готують вхід і останній прихований шар до одиниць контексту, також доступні;

5) основні складові мережі аналізу (PCA) комбінують неконтрольоване і контрольоване вивчення в тій же самій топології. Основою складовою аналізу є неконтрольована лінійна процедура, яка знаходить набір некорельованих особливостей основних компонентів від входу. MLP контролюється, щоб виконати нелінійну класифікацію від цих компонентів;

6) радіальна функція основи (RBF) мережі - нелінійні гібридні мережі, що типово містять єдиний прихований шар обробки елементів (PE). Цей шар використовує гаусовські функції передачі, а не стандарт сигмоїдної функції, що використовується в MLP. Центр та гаусовська дисперсія встановлені неконтрольованими правилами навчання, навчання застосоване до шару продукції. Ці мережі мають тенденцію навчатися набагато швидше ніж MLP;

7) узагальнена регрес (GRNN) / імовірнісна (PNN) мережа . Всі ваги мережі можуть бути розраховані аналітично. В цьому випадку кількість центрів групи – за визначенням, дорівнює числу зразків, і вони всі встановлені на ту ж саму різницю. Використовувати цей тип RBF можна тільки тоді, коли кількість зразків є настільки маленькою (<100) або вони дуже розсіяні;

8) самоорганізаційна мережа (SOFM) перетворює вхід довільного вимірювання в одну або дві розмірні дискретні мережі і їх піддає топологічному обмеженню. Мережі мають особливе обчислення, використовуючи неконтрольоване навчання за Kohonen'ом. Результат SOFM – мережі може використовуватися як вхід до контрольованої нейронної мережі типу MLP. Ключовою перевагою цієї SOFM – мережі є менші вимоги до вхідних даних на основі використання процесу самоорганізації;

8) поточні мережі (TLRN) зв'язані з питаннями часу. MLP мережі є структурами з малими строками пам'яті. Більшість реальних даних містять інформацію, що змінюється з часом. Більшість нейронних мереж - просто статичні класифікатори. TLRN – мистецтво в нелінійному часовому прогнозуванні та ідентифікації систем і часової класифікації об'єктів;

9) CANFIS - модель об'єднує нечіткі входи, що пристосовуються, з модульною нейронною мережею до швидко і точно наближених складних функцій. Нечіткі системи виведення є корисними також, оскільки вони комбінують пояснювальний характер правил з потужністю "чорного ящика" нейронної мережі;

10) SVM – модель створена шляхом використання ядра Adatron алгоритм. Ядро Adatron входу мережі оптимально відокремлює дані в відповідні класи, ізолюючи ті входи, які попадають близько до границі даних. Тому ядро Adatron особливо ефективно у відділенні наборів даних, які розділяють складні границі. SVM може використовуватися тільки для класифікації, а не для наближення функцій.

**ДОДАТОК Д. Схеми алгоритмів, що моделюють роботу ділянки
механічної обробки деталей**

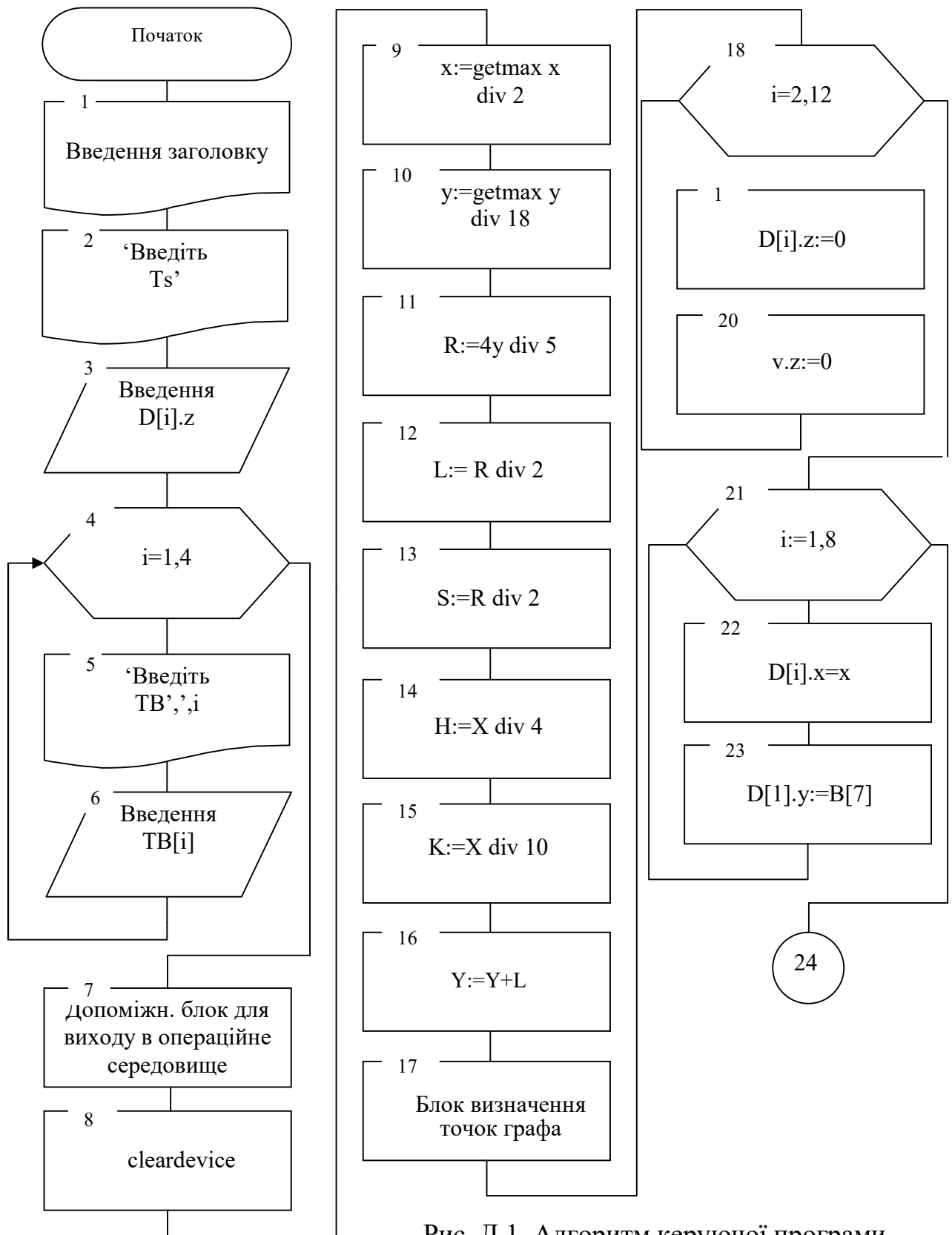
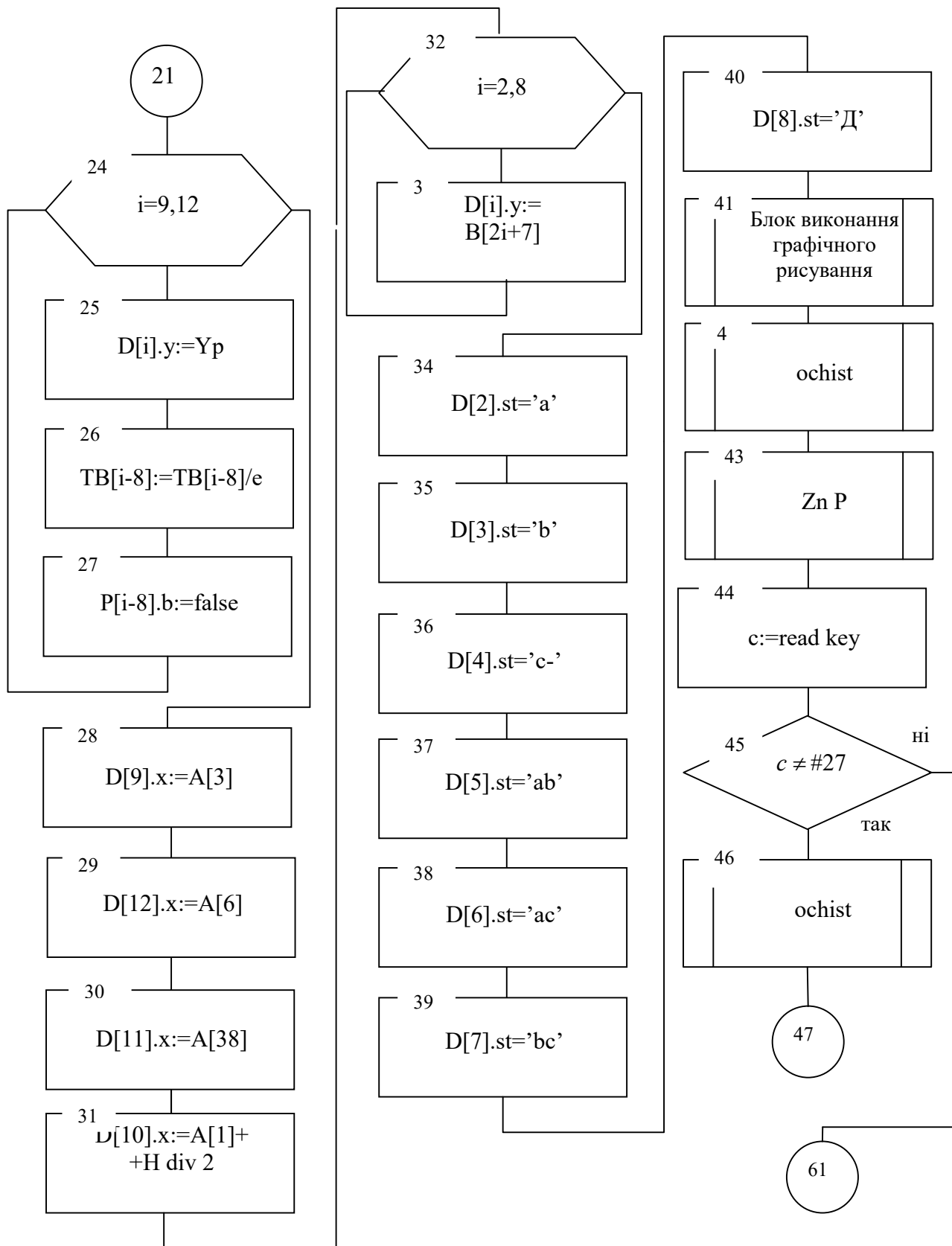
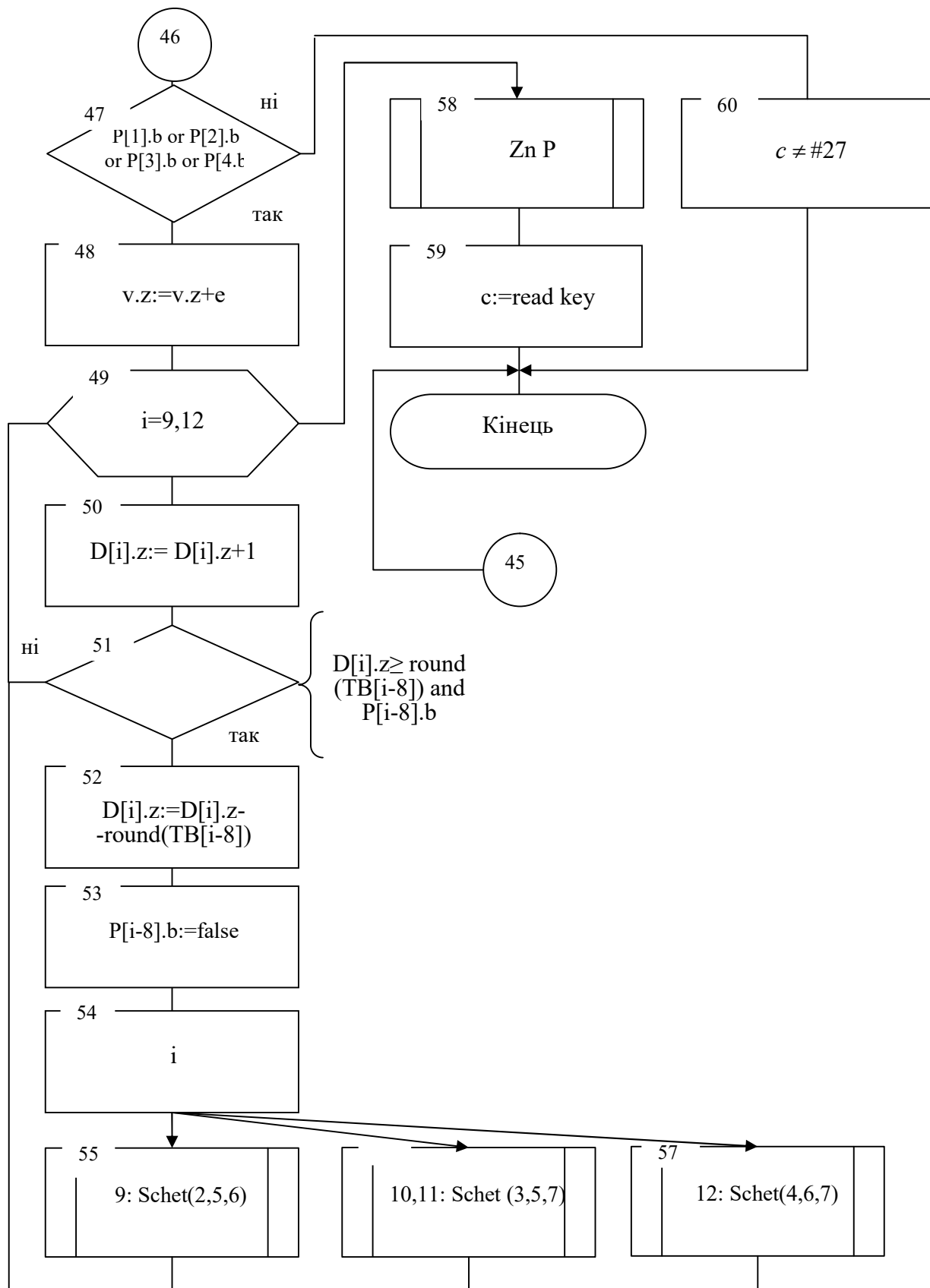


Рис. Д.1. Алгоритм керуючої програми.



Продовження рис. Д.1.



Продовження рис. Д.1.

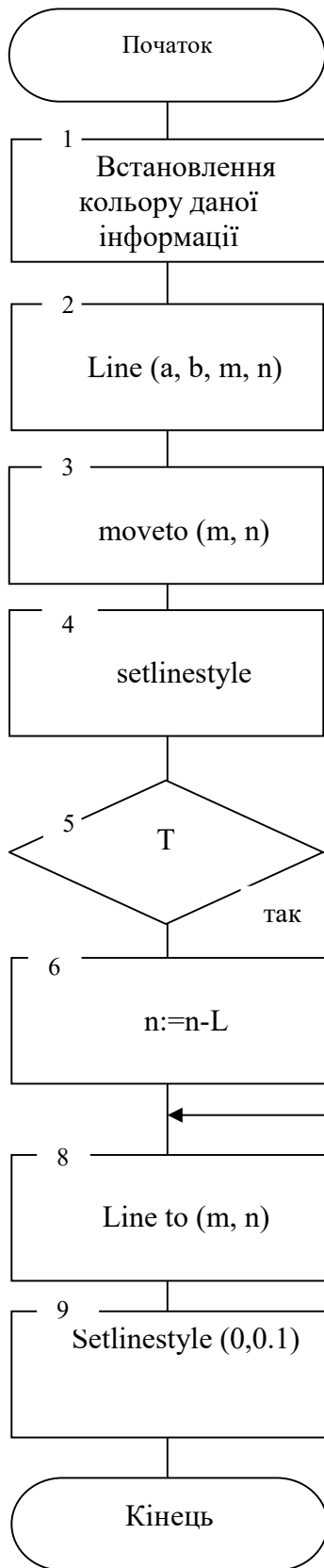


Рис. Д.2. Алгоритм процедури St.

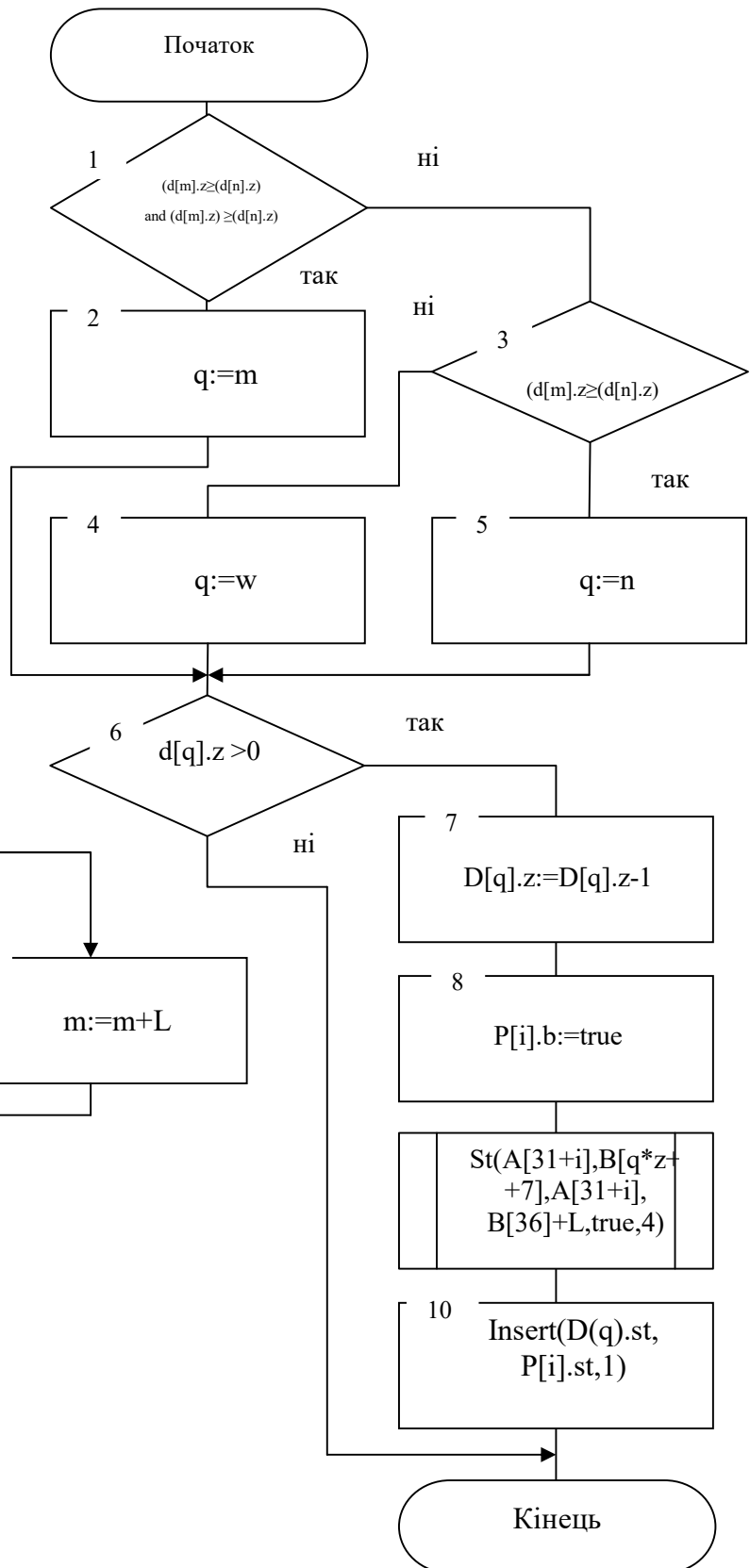


Рис. Д.3. Алгоритм процедури Rav.

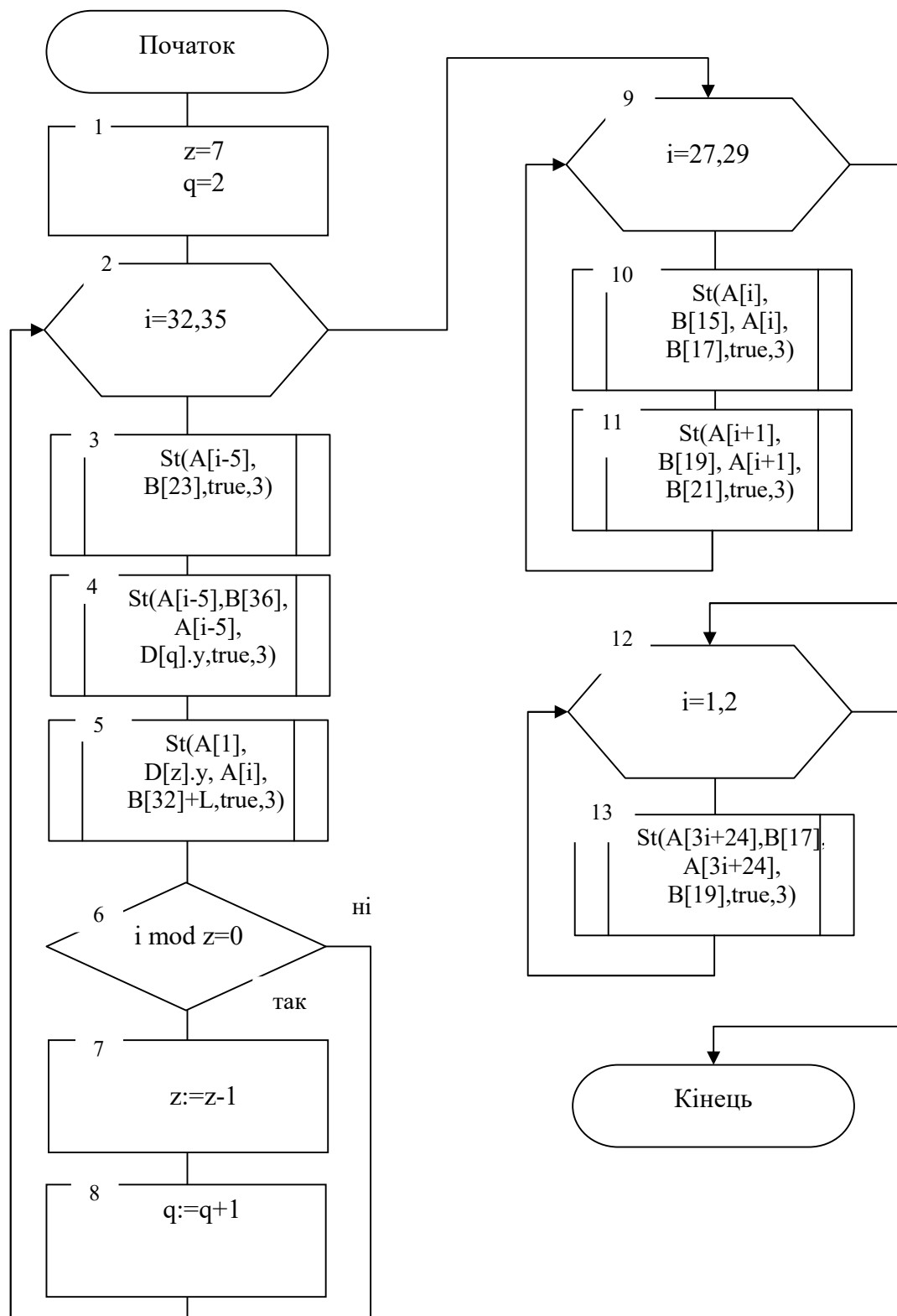


Рис. Д.4. Алгоритм процедури Ochist.

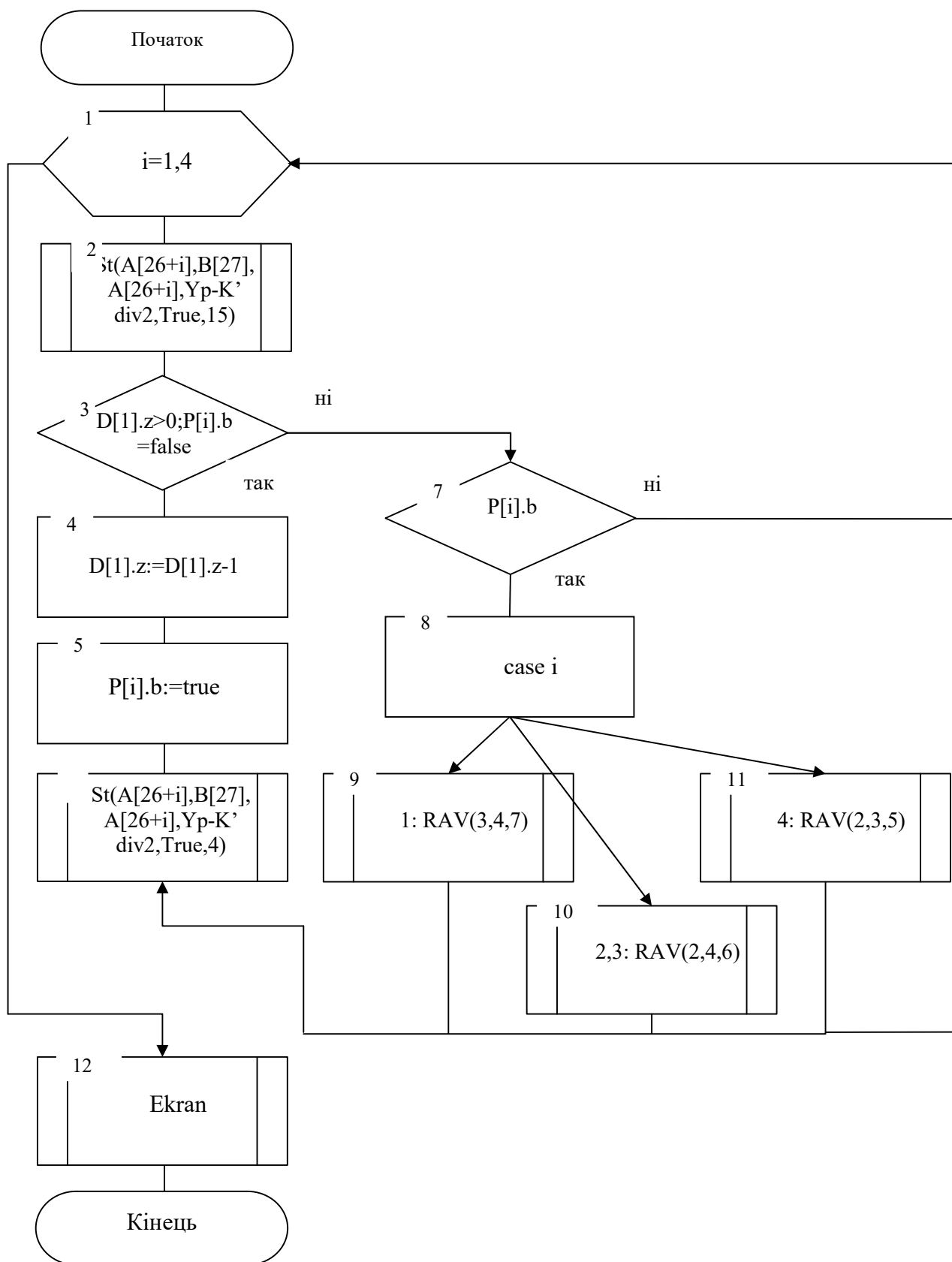


Рис. Д.5. Алгоритм процедури Zpn.

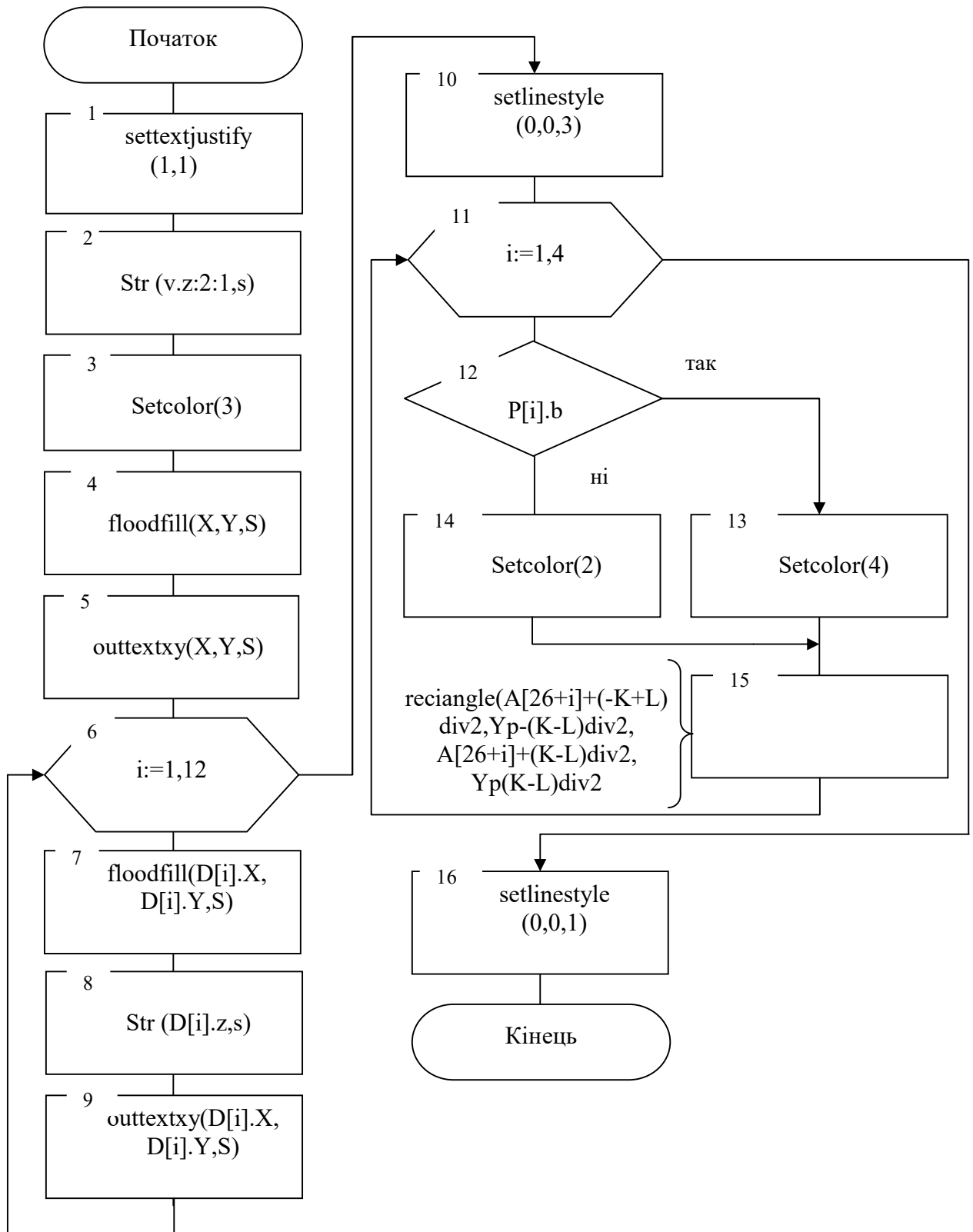


Рис. Д.6. Алгоритм процедури Escan.

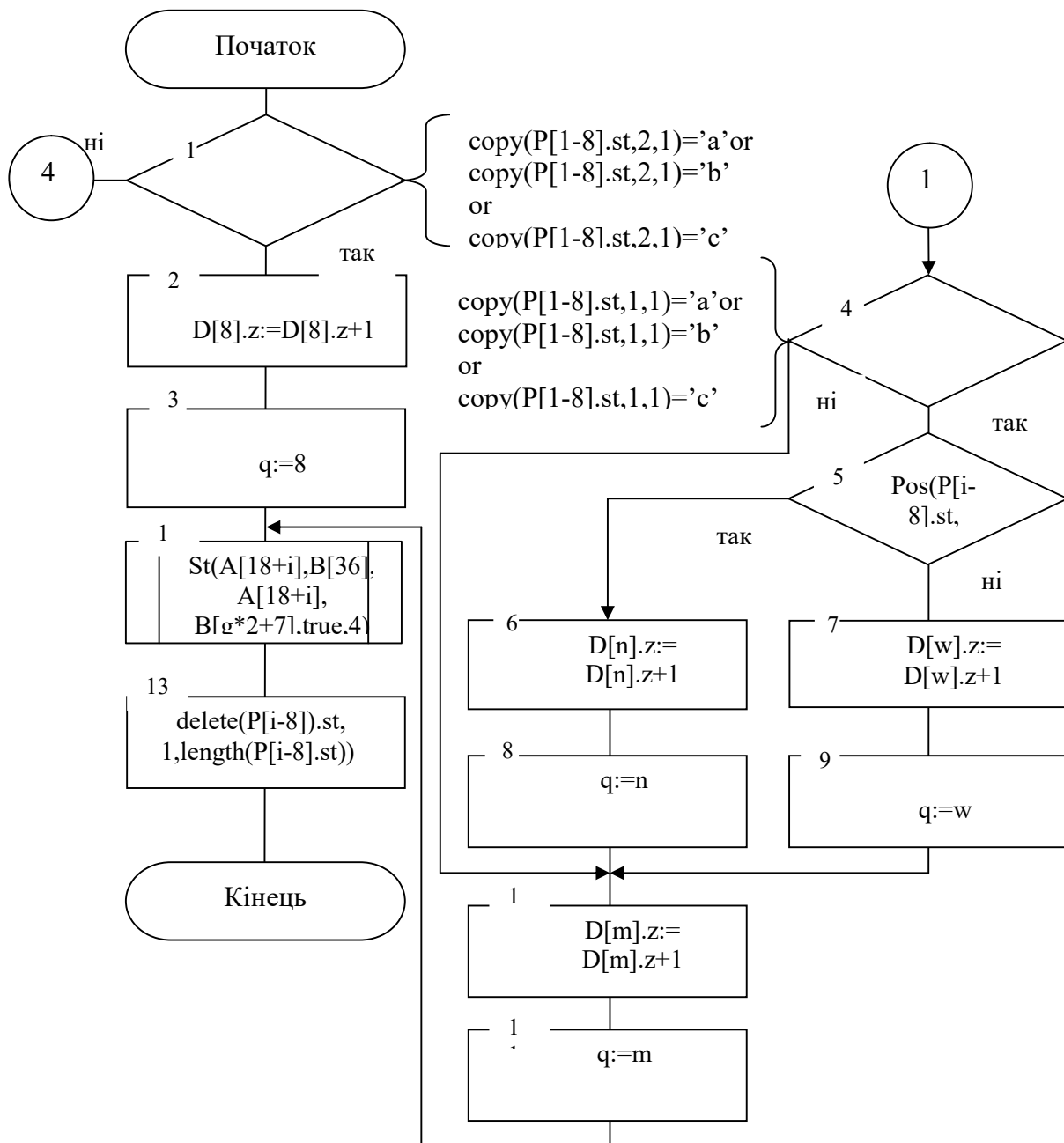


Рис. Д.7. Алгоритм процедури Schet.

ДОДАТОК Е

**Мережі Петрі, що моделюють роботу ділянки механічної обробки деталей
за станом в різний час від початку обробки партії деталей**

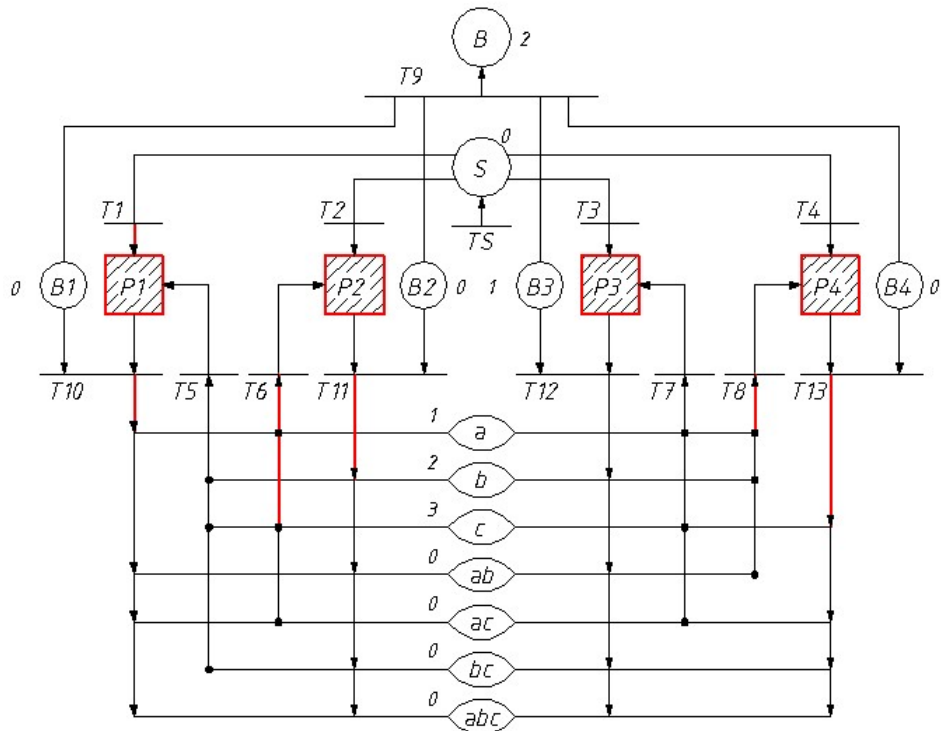


Рис. Е.1. Стан обладнання через 2 хвилини від початку обробки.

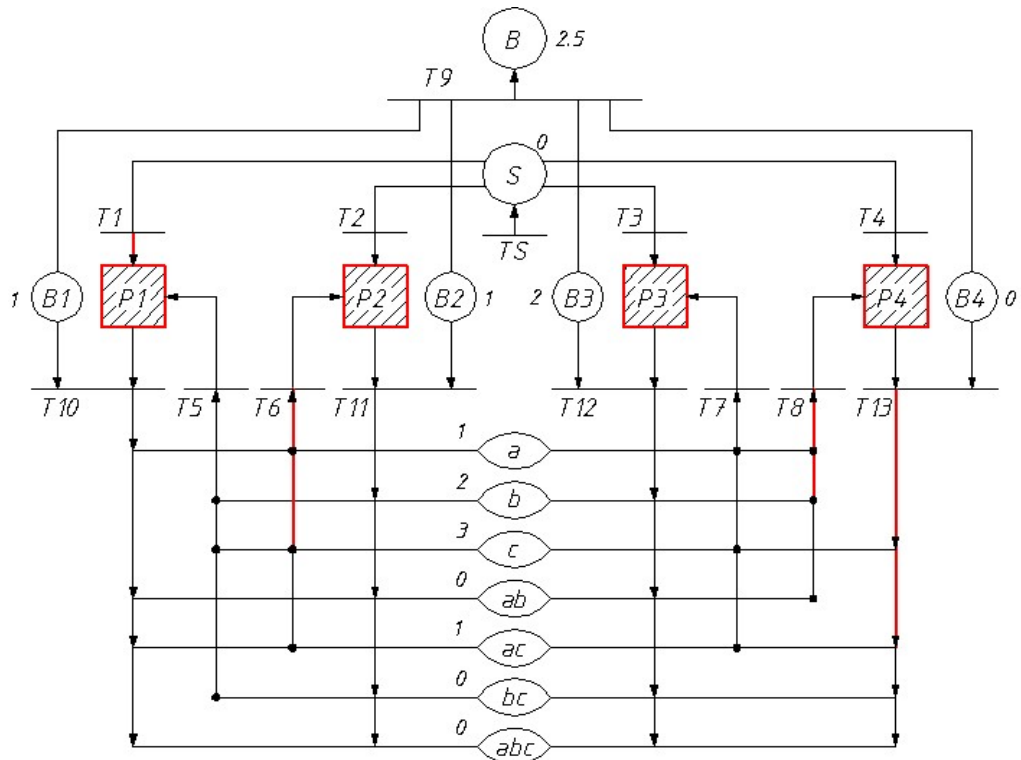


Рис. Е.2. Стан обладнання через 2,5 хвилини від початку обробки.

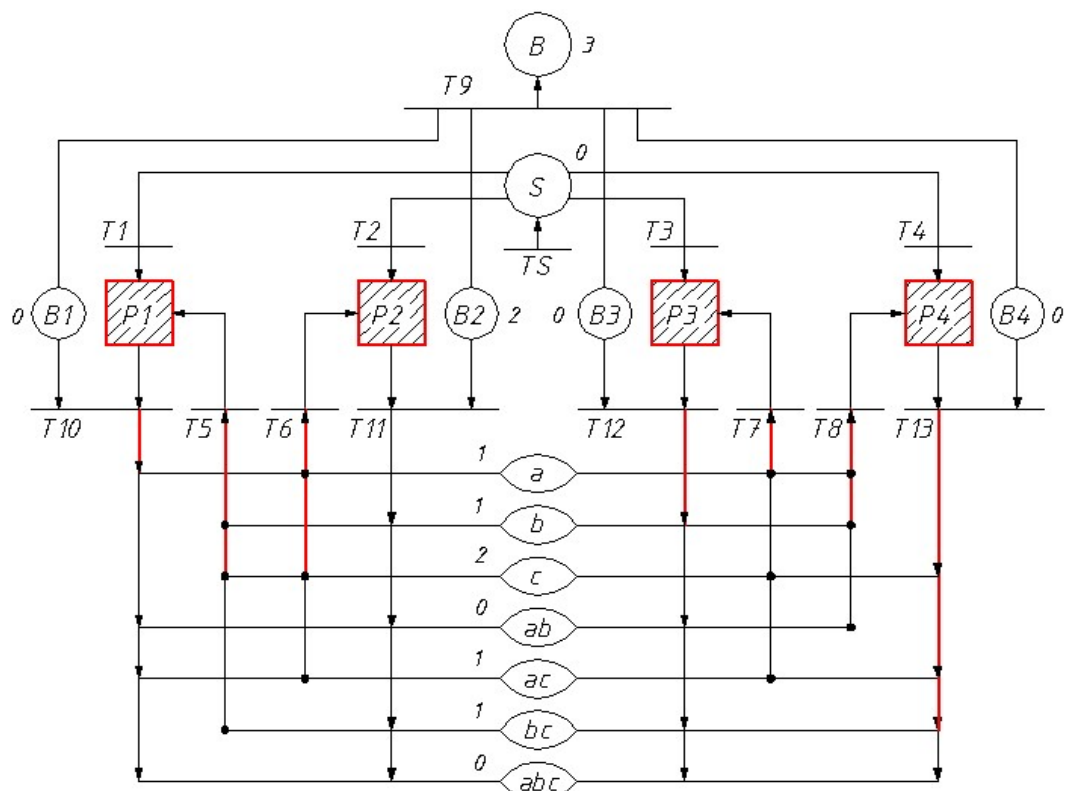


Рис. Е.3. Стан обладнання через 3 хвилини від початку обробки.

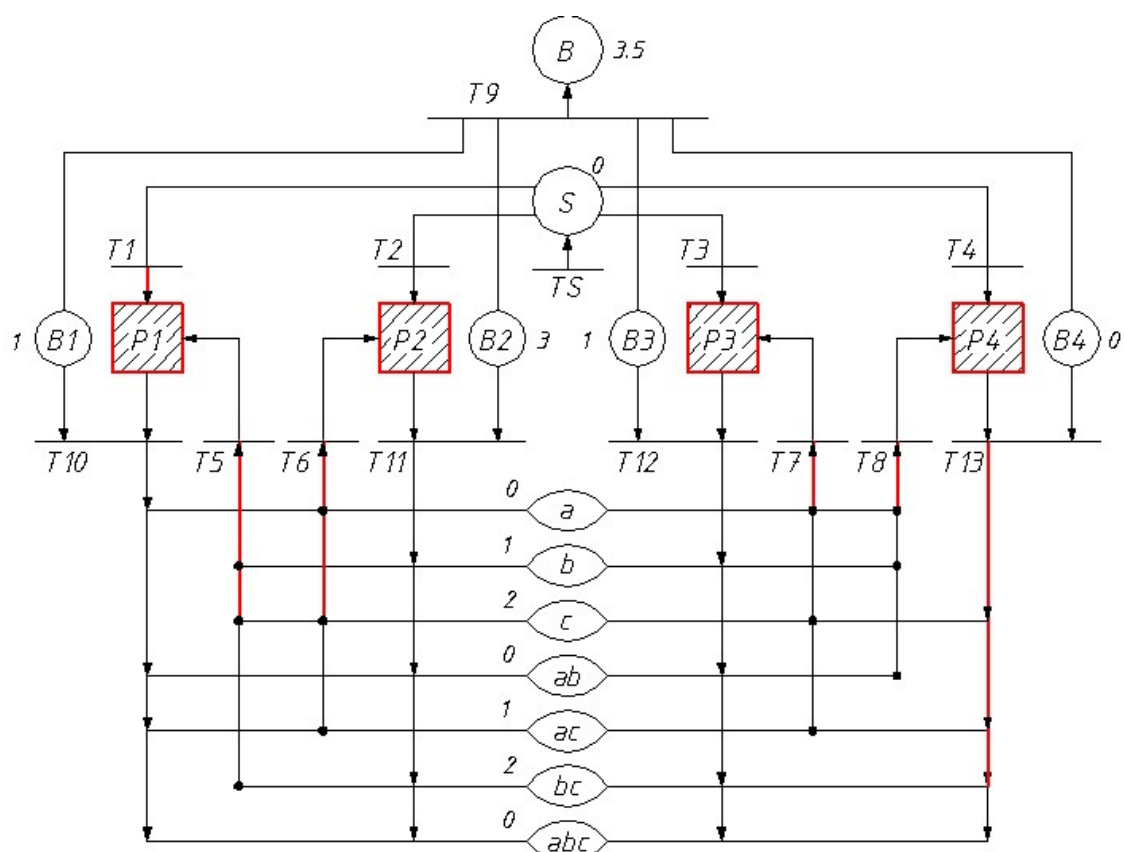


Рис. Е.4. Стан обладнання через 3,5 хвилини від початку обробки.

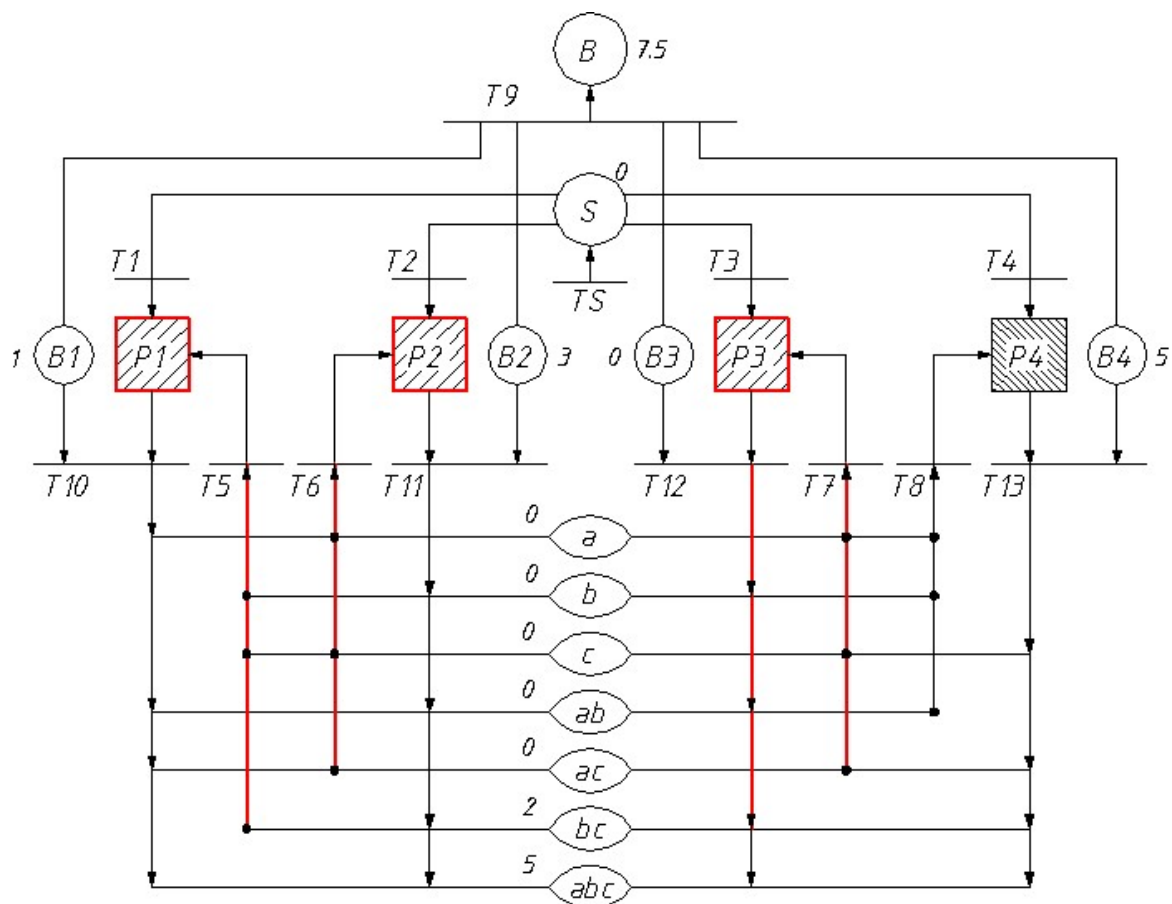


Рис. Е.5. Стан обладнання через 7,5 хвилин від початку обробки.

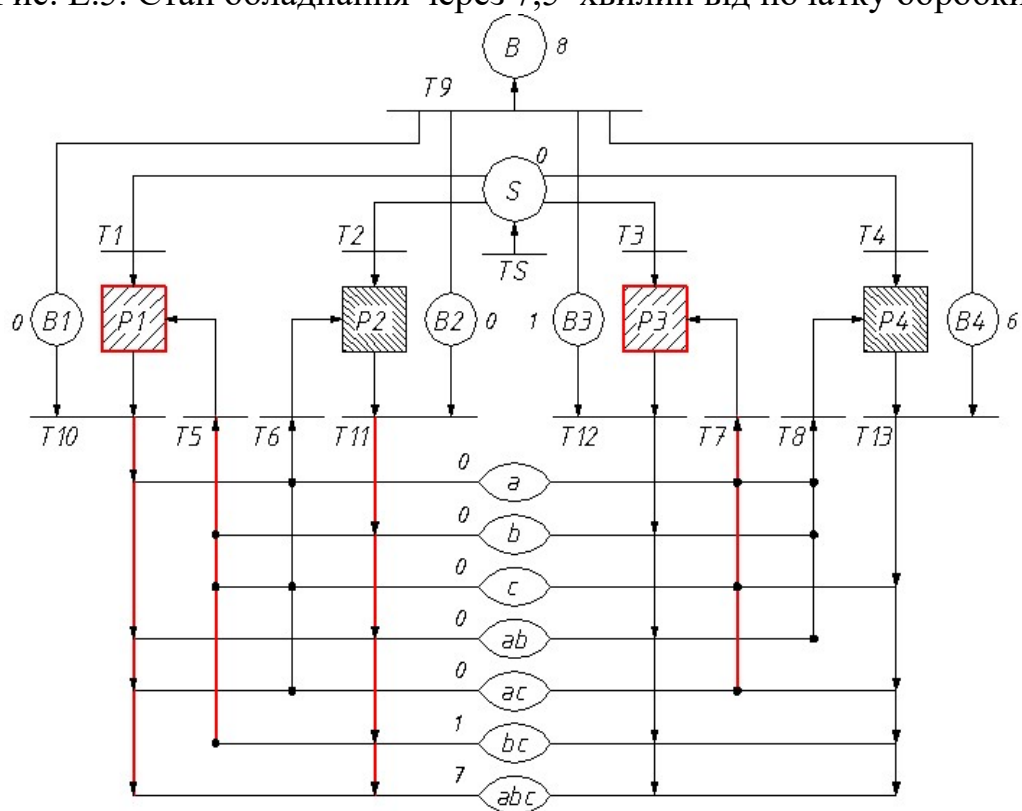


Рис. Е.6. Стан обладнання через 8 хвилин від початку обробки.

ДОДАТОК К

Інформаційні масиви автоматизованої системи проектування маршрутної технології виготовлення корпусних деталей

Таблиця К.1.

Значення кодів для різних груп матеріалів

Код	Матеріал
1	2
0	Сталь конструкційна із вмістом вуглецю до 0,25 %
1	Сталь конструкційна із вмістом вуглецю від 0,25 до 0,6 %
2	Сталь конструкційна із вмістом вуглецю 0,6 і більше %
3	Сталь інструментальна вуглецева
4	Сталь конструкційна низьколегована
5	Сталь конструкційна легована
6	Сталь інструментальна легована
7	Сталь інструментальна швидкорізальна
8	Сталь або сплав корозійностійкий, жаростійкий чи жароміцний
9	Сталь з високим омичним опором
10	Сталь або сплав прецизійний (крім сплавів зі спеціальними магнітними властивостями)
11	Сталь або сплав електротехнічний (у тому числі сплави зі спеціальними магнітними властивостями)
12	Чавун сірий простий
13	Чавун сірий модифікований
14	Чавун ковкий
15	Чавун високоміцний
16	Чавун з особливими властивостями
17	Мідь
18	Латунь

1	2
19	Бронза
20	Мідно-нікелевий сплав
21	Алюміній
22	Сплав на основі алюмінію
23	Сплав на основі магнію
24	Титан або сплав на його основі
25	Хром або сплав на його основі
26	Нікель або сплав на його основі
27	Тугоплавкий метал або сплав на його основі
28	Цинк або сплав на його основі
29	Свинець, олово або сплав на його основі
30	Благородний метал або його сплав
31	Біметал
32	Металокерамічний конструкційний матеріал
33	Металокерамічний інструментальний твердий сплав
34	Пластмаса термопластична
35	Пластмаса термопластична без наповнювача
36	Пластмаса термопластична з наповнювачем
37	Пластмаса термореактивна
38	Пластмаса термореактивна з порошковим наповнювачем
39	Пластмаса термореактивна з волокнистим наповнювачем
40	Пластмаса термореактивна шарувата
41	Пластмаса газонаповнена
42	Гума м'яка
43	Гума жорстка (ебонітова)
44	Гума пориста

Продовження таблиці К.1.

1	2
45	Деревина або матеріал на її основі
46	Паперовий матеріал
47	Текстильний матеріал
48	Шкіра
49	Азбест або матеріал на його основі
50	Силікатний матеріал (скло, ситал, кам'яне скло)
51	Керамічний матеріал
52	Графіт або вугільнографітовий матеріал
53	Алмаз

Таблиця К.2.

Коди вагової характеристики деталі

Код	Маса, кг.	Код	Маса, кг.	Код	Маса, кг.
1	2	1	2	1	2
0	До 0,003	10	1,6 – 2,5	20	250 – 400
1	0,003 – 0,006	11	2,5 – 4	21	400 – 630
2	0,006 – 0,012	12	4 – 10	22	630 – 1000
3	0,012 – 0,025	13	10 – 16	23	1000 – 1600
4	0,025 – 0,05	14	16 – 25	24	1600 – 2500
5	0,05 – 0,1	15	25 – 40	25	2500 – 5000
6	0,1 – 0,2	16	40 – 63	26	5000 – 10000
7	0,2 – 0,5	17	63 – 100	27	10000 – 20000
8	0,5 – 1	18	100 – 160	28	Більше 20000
9	1 – 1,6	19	160 – 250		

Таблиця К.3.

Коди термічної обробки

Код	Вид обробки		
0	Без термічної обробки		
1	З термічною	HRC \leq 38	
2	обробкою до або	38 < HRC \leq 52	
3	між операціями механічної	HRC > 52	Окремих поверхонь деталі
4	обробки		Усіх поверхонь деталі
5	З термічною обробкою після операцій механічної обробки		

Таблиця К.4.

Коди першого параметру розмірної характеристики

Для підкласу 508000		Підкласи 505000, 506000 (506100 – 506200, крім 506180, 506280), 507000 (507800), 509000 (509200)		Підкласи 501000, 504000, 506000 (506100 – 506800, крім 506110 – 506170, 506210 – 506270), 507000 (507100 – 507700), 509000 (509400)		Підклас 509000 (509100)	
Найбільший зовнішній діаметр, мм		Найбільший зовнішній діаметр або ширина, мм		Ширина, мм		Найбільший зовнішній діаметр, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	До 2,5	0	До 5	0	До 20	0	До 10
1	2,5 – 5	1	5 – 10	1	20 – 45	1	10 – 20

1	2	3	4	5	6	7	8
2	5 – 10	2	10 – 16	2	45 – 71	2	20 – 25
3	10 – 16	3	16 – 28	3	71 – 95	3	25 – 32
4	16 – 22	4	28 – 71	4	95 – 120	4	32 – 40
5	22 – 28	5	71 – 100	5	120 – 150	5	40 – 71
6	28 – 36	6	100 – 190	6	150 – 190	6	71 – 100
7	36 – 45	7	190 – 240	7	190 – 240	7	100 – 140
8	45 – 71	8	240 – 420	8	240 – 320	8	140 – 160
9	71 – 95	9	420 – 630	9	320 – 400	9	160 – 200
10	95 – 120	10	630 – 1060	10	400 – 500	10	200 – 250
11	120 – 150	11	1060 – 1320	11	500 – 630	11	Більше 250
12	150 – 190	12	1320 – 1700	12	630 – 800		
13	190 – 240	13	1700 – 2360	13	800 – 1250		
14	240 – 320	14	Більше 2306	14	1250 – 1600		
15	320 – 420			15	1600 – 2000		
16	420 – 560			16	2000 – 2500		
17	560 – 750			17	2500 – 3200		
18	750 – 1060			18	3200 – 5000		
19	1060 – 1320			19	Більше 5000		
20	1320 – 1700						
21	1700 – 2360						
22	2360 – 3000						
23	3000 – 3750						
24	3750 – 4750						
25	4750 – 6000						
26	6000 – 7500						
27	7500 – 9500						
1	2						
28	Більше 9500						

Таблиця К.5.

Коди другого параметру розмірної характеристики

Для підкласу 508000		Підкласи 505000, 506000 (506100 – 506200, крім 506180, 506280), 507000 (507800), 509000 (509200)		Підкласи 501000, 504000, 506000 (506100 – 506800, крім 506110 – 506170, 506210 – 506270), 507000 (507100 – 507700), 509000 (509400)		Підклас 509000 (509100)	
Довжина, мм		Довжина, мм		Довжина, мм		Довжина, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	До 6	0	До 20	0	До 20	0	До 6
1	6 – 20	1	20 – 32	1	20 – 45	1	6 – 10
2	20 – 45	2	32 – 45	2	45 – 75	2	10 – 20
3	45 – 75	3	45 – 75	3	75 – 120	3	20 – 32
4	75 – 95	4	75 – 120	4	120 – 150	4	32 – 45
5	95 – 120	5	120 – 190	5	150 – 200	5	45 – 75
6	120 – 150	6	190 – 350	6	200 – 240	6	75 – 120
7	150 – 190	7	350 – 500	7	240 – 350	7	120 – 240
8	190 – 240	8	500 – 710	8	350 – 500	8	240 – 350
9	240 – 350	9	710 – 1000	9	500 – 710	9	Більше 350
10	350 – 500	10	1000 – 1400	10	710 – 850		
11	500 – 710	11	1400 – 2000	11	850 – 1250		
12	710 – 1000	12	2000 – 2650	12	1250 – 1600		
13	1000 – 1400	13	Більше 2650	13	1600 – 2000		
14	1000 – 1400			14	2000 – 2800		
15	2000 – 2800			15	2800 – 3850		

1	2		5	6	
16	2800 – 5000		16	3850 – 4500	
17	5000 – 8000		17	4500 – 5600	
18	8000 – 10000		18	5600 – 7500	
19	Більше 10000		19	Більше 7500	

Таблиця К.6.

Коди третього параметру розмірної характеристики

Для підкласу 508000		Підкласи 505000, 506000 (506100 – 506200, крім 506180, 506280), 507000 (507800), 509000 (509200)		Підкласи 501000, 504000, 506000 (506100 – 506800, крім 506110 – 506170, 506210 – 506270), 507000 (507100 – 507700), 509000 (509400)		Підклас 509000 (509100)	
Діаметр центрального отвору, мм		Товщина листа, стрічки (зовнішній діаметр труби, діаметр прутка), мм		Висота, мм		Діаметр дроту, мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	Без центрального отвору	0	До 0,2	0	До 6	0	До 0,8
1	До 2,5	1	0,2 – 0,5	1	6 – 20	1	0,8 – 1,6
2	2,5 – 10	2	0,5 – 0,8	2	20 – 50	2	1,6 – 2,5
3	10 – 20	3	0,8 – 1,6	3	50 – 71	3	2,5 – 4

Продовження таблиці К.6.

1	2	3	4	5	6	7	8
4	20 – 50	4	1,6 – 2,5	4	71 – 95	4	4 – 6
5	50 – 100	5	2,5 – 6	5	95 – 120	5	6 – 10
6	100 – 125	6	6 – 10	6	120 – 150	6	10 – 16
7	125 – 200	7	10 – 16	7	150 – 190	7	16 – 32
8	200 – 400	8	16 – 20	8	190 – 240	8	Більше 32
9	400 – 500	9	20 – 32	9	240 – 320		
10	500 – 800	10	32 – 50	10	320 – 400		
11	Більше 800	11	50 – 71	11	400 – 500		
		12	71 – 95	12	500 – 630		
		13	95 – 120	13	630 – 800		
		14	120 – 150	14	800 – 1250		
		15	150 – 200	15	1250 – 2000		
		16	Більше 200	16	2000 – 3150		
				17	3150 – 5000		
				18	Більше 5000		

Таблиця К.7.

Коди точнісних параметрів

Код	Квалітет точності
1	2
0	З необробленими поверхнями або без них
1	До 4
2	4
3	5
4	6 – 7

Продовження таблиці К.7.

1	2
5	8 – 9
6	10 – 12
7	13 – 14

Таблиця К.8.

Коди параметрів шорсткості

Код	Ra	Rz
0	Необроблена поверхня	
1	80 – 10	320 – 40
2	10 – 2,5	40 – 10
3	2,5 – 0,63	10 – 3,2
4	0,63 – 0,08	3,2 – 0,4
5	0,08 – 0,01	0,4 – 0,025

Таблиця К.9.

Коди різьби.

Код	Вид різьби
0	Відсутня
1	Зовнішня
2	Внутрішня
3	Зовнішня і внутрішня

Таблиця К.10.

Коди пазів

Код	Вид пазу
0	Відсутній
1	Прямий
2	Радіусний

Таблиця К.11.

Коди вікон

Код	Вид вікна
0	Відсутнє
1	Просте прямокутне
2	Просте з округленнями
3	Складної форми

Таблиця К.12.

Коди додаткових отворів

Код	Вид отвору
1	2
0	Отвір відсутній
1	Гладкий, паралельний основній осі деталі
2	Гладкий, перпендикулярний основній осі деталі
3	Гладкий, під кутом, відмінним від прямого, до основної осі деталі
4	Ступінчастий, паралельний основній осі деталі

Продовження таблиці К.12.

1	2
5	Ступінчастий, перпендикулярний основній осі деталі
6	Ступінчастий, під кутом, відмінним від прямого, до основної осі деталі
7	Кілька різної форми, паралельні основній осі деталі
8	Кілька різної форми, перпендикулярні основній осі деталі
9	Кілька різної форми, під кутом, відмінним від прямого, до основної осі деталі

Таблиця К.13.

Коди елементів зубчастих зачеплень

Код	Вид елементів
0	Відсутні
1	Прямі
2	Косі
3	Шевронні
4	Черв'ячні
5	Зубці храповика

Таблиця К.14.

Коди уступів

Код	Вид уступів
0	Відсутні
1	З однієї сторони відкриті
2	З однієї сторони закриті (кишені)
3	З різних сторін відкриті
4	З різних сторін закриті (кишені)

Таблиця К.15.

Коди додаткової обробки

Код	Вид обробки
0	Відсутня
1	Термічна
2	Зварювання, паяння
3	Термічна; зварювання, паяння
4	Покриття
5	Термічна; покриття
6	Зварювання, паяння; покриття
7	Термічна; зварювання, паяння; покриття

ДОДАТОК Л
Структура інформаційних масивів системи „ТехноМастер”

Таблиця Л.1.

Структура бази даних виробів – Izdelie

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
SHIFR	Символьний	10	Шифр виробу
SBORKA	Символьний	20	Позначення складання
NAME	Символьний	20	Назва виробу

Таблиця Л.2.

Структура бази даних деталей – Detal

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
SHIFR	Символьний	10	Шифр деталі
NAME	Символьний	20	Позначення деталі

Таблиця Л.3.

Структура бази даних заголовків деталей – Header

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
NAME	Символьний	20	Позначення деталі
NAIMEN	Символьний	40	Найменування деталі
UTVERDIL	Символьний	20	Затверджувач
NORMOKONT	Символьний	20	Нормоконтролер
RAZRABOTAL	Символьний	20	Розробник
PROVERIL	Символьний	20	Перевіряючий

Структура бази даних операцій (зміст та параметри) - Operac_Main

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
1	2	3	4
NAME_DETAL	Символьний	20	Позначення деталі
SHIFR_DETAL	Символьний	10	Шифр деталі
NUM_OPERAC	Числовий		Номер операції
COMPLECT	Мето		Комплектуючі
V_MATERIAL	Символьний	60	Допоміжні матеріали
DOCS	Символьний	40	Документи
TB	Символьний	20	Інструкції з техніки безпеки
CM	Числовий		Ступінь механізації
PROF	Символьний	15	Професія
RAZRYAD	Числовий		Розряд
USL_TRUDA	Символьний	5	Умови праці
KOL_RAB	Числовий		Чисельність робітників
KOID	Символьний	6	Кількість склад. одиниць, що одночасно оброблюються
ED_NORM	Символьний	6	Одиниця нормування
OVM	Числовий		Об'єм партії
KST	Символьний	6	Коеф. штучного часу
TPZ	Символьний	10	Норма підготовчо-заклучного часу

1	2	3	4
TST	Символьний	10	Норми штучного часу
CEH	Символьний	10	Номер цеху
UCHASTOK	Символьний	10	Номер ділянки
MESTO	Символьний	10	Номер робочого місця
TEXT	Символьний	70	Найменування операції
COD_OPERAC	Символьний	10	Код операції

Таблиця Л.5.

Структура бази даних обладнання для операцій – Operac_Main_Oborud

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
NAME_DETAL	Символьний	20	Позначення деталі
SHIFR_DETAL	Символьний	20	Шифр деталі
NUM_OPERAC	Числовий		Номер операції
TEXT	Символьний	70	Обладнання

Таблиця Л.6.

Структура бази даних пристосувань для операцій - Operac_Main_Instrum

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
NAME_DETAL	Символьний	20	Позначення деталі
SHIFR_DETAL	Символьний	20	Шифр деталі
NUM_OPERAC	Числовий		Номер операції
TEXT	Символьний	70	Пристосування

Таблиця Л.7.

Структура бази даних переходів (зміст та параметри) - Pereh_Main

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
NAME_DETAL	Символьний	20	Позначення деталі
SHIFR_DETAL	Символьний	20	Шифр деталі
NUM_OPERAC	Числовий		Номер операції
NUM_PEREH	Числовий		Номер переходу
TEXT	Мемо	40	Зміст переходу
V_MATERIAL	Символьний	60	Допоміжні матеріали
TEMP	Символьний	40	Температура
TIME	Символьний	20	Час
DAVLENIE	Символьний	20	Тиск
SEN	Символьний	10	Номер цеху
UCHASTOK	Символьний	10	Номер ділянки
MESTO	Символьний	10	Номер робочого місця
COD_OPERAC	Символьний	10	Код переходу
TO	Символьний	20	Загальний час
TV	Символьний	20	Допоміжний час

Таблиця Л.8.

Структура бази даних операцій (перелік) - Operac

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
COD	Символьний	4	Код операції
NAME	Символьний	40	Найменування операції

Таблиця Л.9.

Структура бази даних інструментів для переходів - Perek_Main_Instrum

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
NAME_DETAL	Символьний	20	Позначення деталі
SHIFR_DETAL	Символьний	20	Шифр деталі
NUM_OPERAC	Числовий		Номер операції
NUM_PEREH	Числовий		Номер переходу
TEXT	Символьний	70	Інструменти

Таблиця Л.10.

Структура бази даних операцій (нормативна інформація) - Sub_operac1

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
COD_SUB	Символьний	6	Унікальний код операції
COD_OPERAC	Символьний	3	Код операції
NAME	Символьний	50	Найменування операції
TEXT	Символьний	70	Унікальне обладнання для операції

Таблиця Л.11.

Структура бази даних переходів (згрупованих за операціями) – Perekhod

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
COD	Символьний	4	Код групи переходів
NAME	Символьний	40	Найменування групи

Таблиця Л.12.

Структура бази даних переходів (нормативна інформація) - Sub_perehod1

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
COD_SUB	Символьний	6	Код переходу
COD_PEREH	Символьний	4	Код групи переходів
NAME	Символьний	50	Найменування переходу
TEXT	Символьний	70	Зміст переходу
OBORUD1	Символьний	70	Інструмент
OBORUD2	Символьний	70	Інструмент

Таблиця Л.13.

Структура бази даних типів інструменту та пристосувань - Instr

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
ID	Автоінкремент		Унікальний код категорії
COD_ID	Числовий		Унікальний код типу
NAME	Символьний	30	Найменування типу
USLOV	Символьний	20	Умовне позначення типу
GOST	Символьний	20	Позначення стандарту
COMMENT	Символьний	70	Опис типу

Таблиця Л.14.

**Структура бази даних категорій інструментів та пристосувань -
Instr_Menu**

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
ID	Автоінкремент		Унікальний код категорії
NAME	Символьний	40	Найменування категорії інструментів
USLOV	Символьний	4	Умовне позначення категорії

Таблиця Л.15.

**Структура бази даних інструментів та пристосувань (нормативна
інформація) - Instr_More**

Поле	Тип	Розмір поля	Значення
ID	Автоінкремент		Унікальний код інструменту
COD_ID	Числовий		Унікальний код типу
COD_ID_MAIN	Числовий		Унікальний код категорії
NAME	Символьний	70	Найменування інструменту
OBOZNACH	Символьний	30	Позначення інструменту

ДОДАТОК М

Інформаційне забезпечення системи „ТехноМастер”

Таблиця М.1.

Типові технологічні операції

Код операції	Найменування операції
101	Заготовительная
103	Сборка
104	Монтаж
105	Гравировальная
106	Испытание
108	Лакирование
110	Маркирование
111	Транспортирование
112	Склеивание
113	Расконсервация
114	Настройка
115	Отладка
116	Заливка
117	Обслуживание
118	Окрашивание
119	Сушка
121	Герметизация
120	Контроль

Типові технологічні операції і переходи (фрагмент)

Службовий символ	Код операції	Зміст операції (переходу)	
1	2	3	
А	101	Заготовительная	1*,ВК.30188.<>.
А			2*,ВК.20188.<>.
А			3*, <>
А			4*, ИОТ №53 для радиомонтажников
А			5*, ИОТ №203 при горячем лужении ПОС и «розе»
А			6*, ИОТ №368 при работе на гильотинных ножницах
Б		1 * Рабочее место с местной вытяжной вентиляцией	
Б		2* Стол монтажный	
Б		3* Ножницы гильотинные ГН-6	
Б		1* монт.	
Б		2* сл.-сб.	
О	10101	Править выводы ЭРИ <>. количество выводов <>	
Т		1* Приспособление <>	
Т		2* Плоскогубцы 7814-0084 ГОСТ 1236-73	
Т		3* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013	
О	10102	обрезать выводы ЭРИ <>на длину мм. количество выводов <>	
Т		1* Приспособление <>	
Т		2* Кусачки 7814-0132 ГОСТ 22308-77	
Т		3 * Линейка 1(1-150) ГОСТ 427-75	
О	10103	Зачистить	
О		1* выводы ЭРИ <>	
О		2* на длину <>	
О		3* от остатков компаунда	
О		4* от изоляции шлифованной шкуркой	
О		5*. Количество выводов <>	
О		6*. Количество концов <>	
О		7* <>	
О		8*, выдерживая размер(ы) <>	
Т		1* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013	
Т		2* Нож НМ 150 ОСТ 4Г 0.060.015	
1	2	3	
		3* Шлифовальная шкурка 16А6 ГОСТ 6456-75	
		9* Линейка 1 (1-150) ГОСТ 427-75	

О	10104	Формовать выводы при ЭРИ <>
О		1* по варианту <>
О		2* по вариантам <>
		3* согласно <>
		4*. Количество выводов <>
Т		1* Приспособление К6370-1819
Т		2* Приспособление <>
Т		3* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013
Т		4* Круглогубцы КУГ 150 ОСТ 4Г 0.060.011
Т		5* Шт. циркуль ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-80
Справка технологу. Приспособление К6370-1819 для гибки выводов ЭРИ под углом 90°		
О	10105	Подготовить выводы ЭРИ к монтажу ПО ТТП-366. Количество ЭРИ <>
О	10106	Снять с <>
		1* изоляцию на длину <>
		2* экранную оплетку на длину <>
		3*. количество концов <>
Т		1* Приспособление <>
Т		2* Обжигалка К6377-ООП
Т		3* Зачищалка цеховая
Т		4* Нож НМ 150 ОСТ 4Г 0.060.015
Т		5* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013
Т		6* Линейка 1(1-150) ГОСТ 427-75
О	10107	Наложить на концы изоляции провода <> бандаж из <> по <>. Количество концов <>
Т		1* Ножницы НП 150 ОСТ 4Г 060.014
Т		2* Кусачки 7814-0132 ГОСТ 22308-77
Т		3* Линейка 1 (1-150) ГОСТ 427-75
О	10108	Покрыть бандаж <> по <>
О	10109	Свить провода <>. Количество проводов <>
Т		Плоскогубцы 7814-0084 ГОСТ 7236-73
1	2	3
О	10110	Нарезать <> в размер(ы). Количество <>
Т		1* Приспособление <>
Т		2* Приспособление К6382-0038

Т		3* Кусачки 7814-0132 ГОСТ 22308-77
Т		4* Ножницы НП 150 ОСТ 4Г 060.014
Т		5* Линейка 1 (1-150) ГОСТ 427-75
Т		6* Шт. циркуль ЩЦ-П-250-0,1 ГОСТ 166-80
Справка технологу. Приспособление К63 82-003 8 для отрезки хлорвиниловых трубок		
О	10111	Надеть <> на
О		1* вывод(ы)<>
О		2* корпус(а)<>
О		3* провод(а)<>
О		4* проволоку <>
О		5* перемычк(и) <>
Т		1* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013
О	10112	Флюсовать <>
О		1* погружением во флюс <>
О		2* флюсом <>
О		3*. Количество концов <>
О		4*. количество выводов <>
О		5*. количество соединений <>
Т		1* Ванна 7699-0249
Т		2* Приспособление <>
Т		3* Сосуд 7896-0063
Т		4* Кисть КХИ №6 ТУ17 РФ 4453-70
Т		5* Дозатор ДФ ОСТ 4Г.060.044
О	10113	Лудить <>
О		1 * погружением в расплавленный припой <>
О		2* припоем <>
О		3* припоем <> с флюсом <>
О		4*. Расстояние по длине вывода от зеркала припоя до корпуса не менее 1,3 мм, допустимое количество погружений не более двух, интервал времени между погружениями одних и тех же выводов не менее 5 мин
1	2	3
О		5* количество <>
О		6* контактные площадки под установку ИС с планарными выводами. количество площадок <>
Справка технологу. Вариант перехода 4* предусмотрен для лужения выводов микросхем со штырьковыми выводами.		

Т		1* Ванна 450Н
Т		2* Приспособление <>
Т		3* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013
Т		4* Дозатор ДФ ОСТ 4Г.060.044
Т		5* Паяльник 0891-0004
Т		6* Паяльник 0891-0006
Т		7* Паяльник <>
Р		1* Температура припоя 240...250 грд. цельсия, время лужения 2... 4 С
Р		2* Температура жала паяльника 280...300 грд. цельсия, время лужения 1,5... 2 С
Р		3* Температура припоя 240...250 грд. цельсия, время лужения 1,5... 2 с
Р		4* Температура припоя <> грд. цельсия, время лужения <> С
Р		5* Температура жала паяльника <> грд. цельсия, время лужения<>С
Справка технологу. Режим I* Для лужения жил проводов погружением:		
Режим 2* Для лужения контактных площадок паяльником;		
Режим 3* Для лужения штырьковых выводов микросхем погружением.		
Режимы 2*,1*,3* соответствуют лужению припоем ПОС61.		
О	10114	Подготовить к монтажу
О		1* ИС <> (всего шт.) ПО ВК.25288.00388, РАЗДЕЛЫ 1... 5
О		2* ИС <> (всего шт.) ПО ВК.25288.00001, РАЗДЕЛЫ 1...3
О		3* Вариант формовки <>
О		4* Формовать ис согласно карте эскизов <>
О		5* Формовать ис согласно чертежу <>
О		6* Выводы ЭРИ по ТТП-366. Количество ЭРИ <>
Справка технологу.		Вариант перехода I* - предусмотрен для микросхем , формуемых согласно ОСТ Вариант перехода 2* - для микросхем в круглых корпусах 301.8-21,301.8-2 и 301.12-1
1	2	3
Т		1* Приспособление <>
О	10115	Установить <> на приспособление, вставив выводы в соответствующие отверстия приспособления. отрезать выводы <>
Т		I* Приспособление 7899-0881
Т		2* Приспособление <>
Т		3* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013

Справка технологу.		Присп особление 7899-0881 для обрезки штырьковых выводов микросхем	
О	10116	Извлечь <> из тары	
Т		1* Тара <>	
Т		2* Тара цеховая	
Т		3* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013	
О	10117	Уложить <> в тару	
		1*Тара <>	
		2* Тара цеховая	
		3* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013	
О	10118	Произвести отметку в технологическом паспорте о выполнении операции	
Т		Ручка с пером ТУ25-05-176-68	
О	10119	Нарезать трубку(и) 1.03. <> в размер(ы) <> по ВК.60288.0011<>	
О	10120	Выдержать	
О		1* ЭРИ поз. <>	
О		2* прокладку(и) поз. <>	
О		7* <>	
О		10* при температуре <> грд. цельсия в течение <> мин	
т		1* Шкаф сушильный ШС-40	
А	103	Сборка	1*ВК.30188.<>
А			2*ВК.20188.<>
А			3* <>
1	2	3	4
А			4* ИОТ №56 для слесарей сборщиков
В		1* Рабочее место с местной вб1тяжной вентеляцией	
В		2* Рабочее место слесаря сборщика	
В		сл.-сб.	
О	10301	Выполнить подготовительные работы по	
О		1* ТТП-408, Разделы 1 И 3	
О		2* ВК. 60289.00001	
Справка технологу. Вариант перехода 2* предусмотрен при выполнении подготовительных работ в ц. 30			

О	10302	Установить <> НА(В) <>
О		1 *, зафиксировать положение <>
О		2*, положив <>
О		3*, совместив по риску (кромке) <>
О		4*, совместив отверстия <>
О		5*, совместив оси <>
О		6*, выдерживая размер(ы) <>
О		7*, до упора
О		8*, симметрично <>
О		9*, вставить в отверстия заклепки поз. <>
О		10*, развальцевать <>
О		11*, расклепать <>
О		12*, запрессовать <>
О		13*, осадить <>
О		14*, завернуть до упора <>
О		15*, согласно чертежу <>
		16*, на клее <> ПО <>
О		17*, совместив склеиваемые поверхности без смещения
О		18*,раскернить<>
Т		1* Подставка цеховая
Т		2* Приспособление <>
Т		3* Пресс ручной 1860-1620
Т		4* Бородок 7851-<> ГОСТ 7214-12
Т		5* Молоток 7850- 0115 ГОСТ 7214-72
Т		6* Обжимка <>
Т		7* Обжимка 7851 -<> ГОСТ 7215-73
Т		8* Развальцовка <>
1	2	3
Т		9* Отвертка 7810-<> ГОСТ 17199-71
Т		10* Ключ <>
Т		11* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013
Т		12* <>
Т		13* Линейка 1(1-150) ГОСТ 427-78
Т		14* Шт. циркуль ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-80
Т		15* Глубиномер ГМ-100 ГОСТ 7470-78
Т		16* Микрометр МК <> ГОСТ 6507-78
О	10303	Подложить <> под <>
Т		1* <>
О	10304	Установить <> на(в) <> закрепить
О		1* винтами <>

О		2* винтами <> шайбами <>
О		3* винтами <> шайбами <> гайками <>
О		4* гайками <>
О		5* гайками <>шайбами <>
О		6* болтами <>
О		7* болтами <> шайбами <>
О		8* болтами <> гайками <> шайбами <>
О		9* согласно чертежу <>
О		10* собственным крепежом <>
О		11 * выдерживая размер(ы)
О		12* размер(ы) обеспечивается приспособлением
О		13* одновременно производя стопорение <> по ВК.252888.00023, вид о
О		14* ЭРИ устанавливать на пасту КПТ-8 ПО ВК.25289.00014
Т		1* ПриспособлениЕ <>
Т		2* Ключ <>
Т		3* Ключ ВК 7812-<> СТП ВК 447-73
Т		4* Ключ 7811 -<> ГОСТ 2839-80
Т		5* Отвертка 7810-<> ГОСТ 17199-71
Т		6* Пинцет ППМ 150 ОСТ 4Г 0.060.013
Т		7* Плоскогубцы 7814-0084 ГОСТ 7236-73
Т		10* Шт. Циркуль ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-80
О	10305	Закрепить <>
О		1* винтами <>
О		2* винтами <> шайбами <>
1	2	3
О		3* винтами <> шайбами <>гайками <>
О		4* винтами <> гайками <>
О		5* гайками <>
О		6* гайками <>шайбами <>
О		7* болтами <>
О		8* болтами <> шайбами <>
О		9* болтами <> гайками <> шайбами <>
О		10* собственным крепежом <>
О		11* подложить (проложить) <>
О		12* выдержать размер(ы) <>
О		13* одновременно производя стопорение <> по ВК.252888.00023, вид <>
О		14* кернением в <> месте(ах)
Т		2* Ключ ВК 7812-<> СТПВК 447-73
Т		3* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
Т		4* Пинцет ППМ 150 ОСТ4Г 0.060.013
Т		8* Подставка цеховая; Кернер 7843-0 ГОСТ 7213-72; Молоток

		7850- 0115 ГОСТ 7214-72
Т		9* Линейка 1(1-150) ГОСТ 427-78
Т		10* Шт. циркуль ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-80
О	10306	Установить <> на(в) <>вставить <> в отверстие(я) <>закрепить
		1* винтами <>
		2* винтами <> шайбами <>
		3* винтами <> шайбами <>гайками <>
		4* винтами <>гайками <>
		5* гайками <>
		6* гайками <>шайбами <>
Т		1 * Отвертка 7810-<>ГОСТ 17199-71
Т		2* Ключ
Т		3* Ключ ВК 7812-<> СТПВК 447-73
Т		4* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
О	10307	Установить <> на(в) <>подложить (проложить) <>закрепить
О		1* винтами <>
О		2* винтами <>шайбами <>
О		3 * винтами <>гайками <> шайбами <>
О		4* гайками <>
1	2	3
О		5* гайками <> шайбами <>
О		6* болтами <>
О		7* болтами <>шайбами <>
О		8* болтами <>гайками <>
О		9* болтами <>гайками <>шайбами <>
О		10* собственным крепежом <>
О		11* выдерживать размер(ы)
О		12* одновременно производя стопорение по ВК.252888.00023, вид <>
О		13* ЭРИ устанавливать на пасту КПТ-8 ПО ВК.25289.00014
Т		1 * Отвертка 7810-<> ГОСТ 17199-71
Т		2* Ключ<>
Т		3* Ключ ВК 7812-0 СТПВК 447-73
Т		4* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
Т		5* Плоскогубцы 7814-0084 ГОСТ 7236-73
Т		8* Линейка 1(1-150) ГОСТ 427-78
Т		9* Шт. циркуль ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-80
О	10309	Зафиксировать положение винтом(ами) <>
О		1 * Отвертка 7810-<> ГОСТ 17199-71

О	10310	довернуть
		1* гайки <>
		2* винты <>
Т		1 * Отвертка 7810-<> ГОСТ 17199-71
Т		2* Ключ<>
Т		3* Ключ ВК 7812-<> СТПВК 447-73
Т		4* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
О	10311	Ввернуть <> в отверстие(я) <>
О		1 *, подложить (проложить) <>
О		2*, выдержать размер <>
О		3*. деталь(и) ставить на клею <> по <>
О		10*. НАЛИЧИЕ КЛЕЯ НА О НЕ ДОПУСКАЕТСЯ
Т		1* Приспособление <>
Т		2* Отвертка 7810-<>ГОСТ 17199-71
Т		3* Ключ<>
Т		4* Ключ ВК 7812-<> СТПВК 447-73
1	2	3
Т		5* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
Т		6* Шпильковерт К 5470-0478
Т		10* Шт. циркуль ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-80
О	10312	Надеть <> на <> ввернуть <> в отверстие(я) <>
О		1*, проложив <>
Т		1 * Отвертка 7810-<> ГОСТ 17199-71
Т		2* Ключ<>
Т		3* Ключ ВК 7812-<> СТПВК 447-73
Т		4* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
О	10313	Навернуть <> на <>
Т		1* Ключ<>
Т		2* Ключ ВК 7812-0 СТП ВК 447-73
Т		3* Ключ 7811-<> ГОСТ 2839-80
О	10314	Стопорить <> по <>вид <>
О	10315	Покрыть <> по ВК. 25273.00066 В <> СЛОИ(Я)
О		1*, Условия эксплуатации <>

О		2*. Количество мест покрытия<>
О	10316	Обернуть <>
О		1*. Конец изоляции крепить <>
О		2* жгут <> ПО ВК.600288.00098
Т		1* Сосуд 7896-0065
Т		2* Ножницы НЦ 150 ОСТ 4Г 0.060.014
Т		3* Кисть КХК №6 ТУ17 РСФСР 4453-70
О	10317	Установить между <>
О		1 * сердечником(ами) и катушкой(ами)
О		2* торцами сердечников
О		3* катушками
О		4* вкладышем(ами) и крышкой(ами)
О		5* сердечником(ами) и радиатором(ами)

Таблица М.3.

Технічні вимоги і вказівки до технологічного процесу або окремої операції

Службовий символ	Код	Зміст технічної вимоги і вказівки
О	20002	При работе с микросхемами и полупроводниковыми приборами выполнять требования СТП ВК 1164-84 по защите их от статического электричества
О	20003	При межоперационном транспортировании использовать тару
Т		Тара <>

ДОДАТОК Н

Робота проектувальника в системі АСПТ МСР „ТехноМастер”

Після запуску програми TMASTER.EXE відкривається головне меню системи (рис.Н.1).

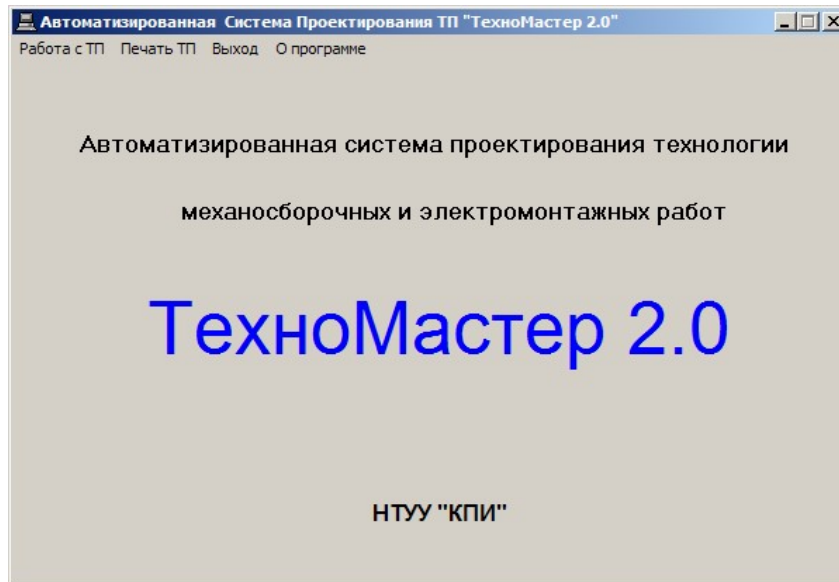


Рис. Н.1. Головне вікно системи „ТехноМастер”.

Головне меню системи має такі розділи:

- „Работа с ТП” - робота з технологічними процесами (перегляд, створення, коректування, видалення та ін.);
- „Печать ТП” - створення звіту по існуючому ТП;
- „Выход” - вихід із програми;
- „О программе” - інформація про програму і розроблювачів.

Після вибору розділу „Работа с ТП” отримаємо підменю цього розділу (рис. Н.2). При активізації цього вікна є можливість працювати з наступними розділами, для виконання різноманітних операцій над ТП:

- „Создать ТП” - створення нового технологічного процесу;
- „Открыть ТП” - перегляд і редагування раніше створених ТП (гаряча клавіша – F3);
- „Удалить ТП” - видалення ТП з бази даних;

„Экспорт / Импорт” - экспорт / імпорт ТП.

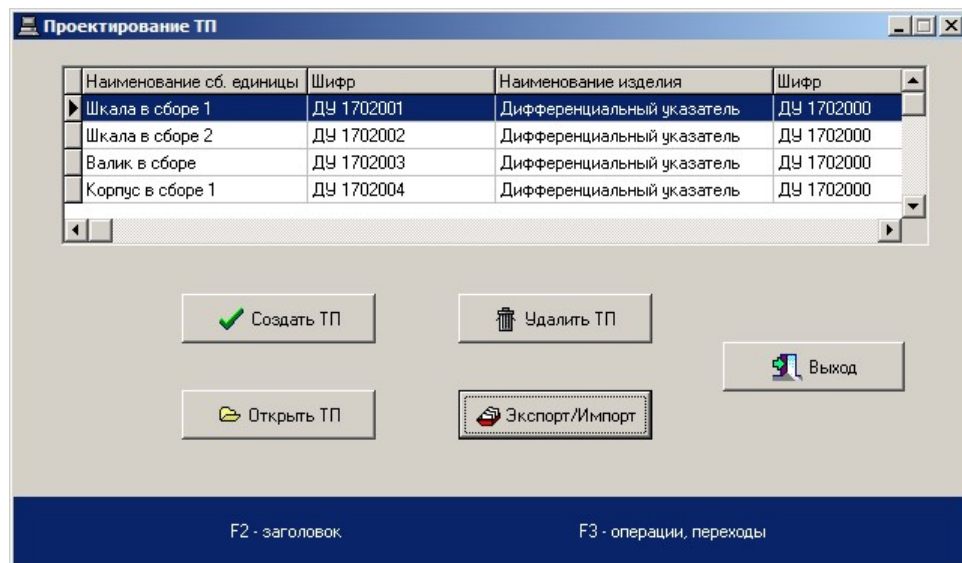


Рис. Н.2. Вікно роботи з технологічними процесами.

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. Н.3).

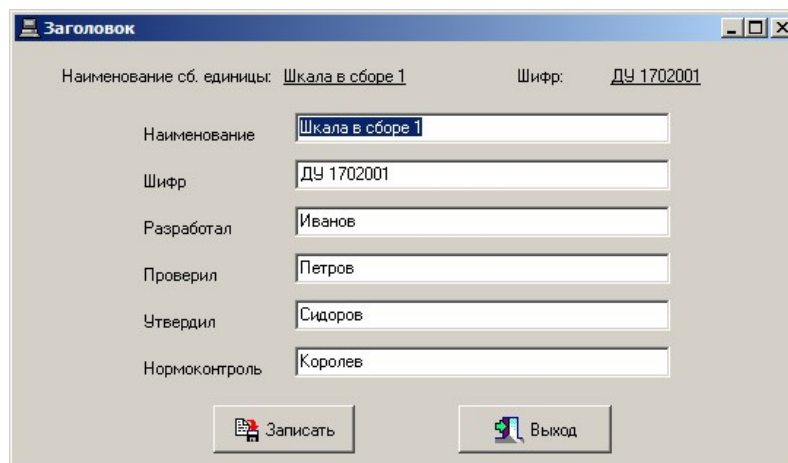


Рис. Н.3. Вікно введення заголовку ТП.

Після натискання клавіші з надписом „Создать ТП” проектувальнику пропонується створити новий технологічний процес (рис. Н.4).

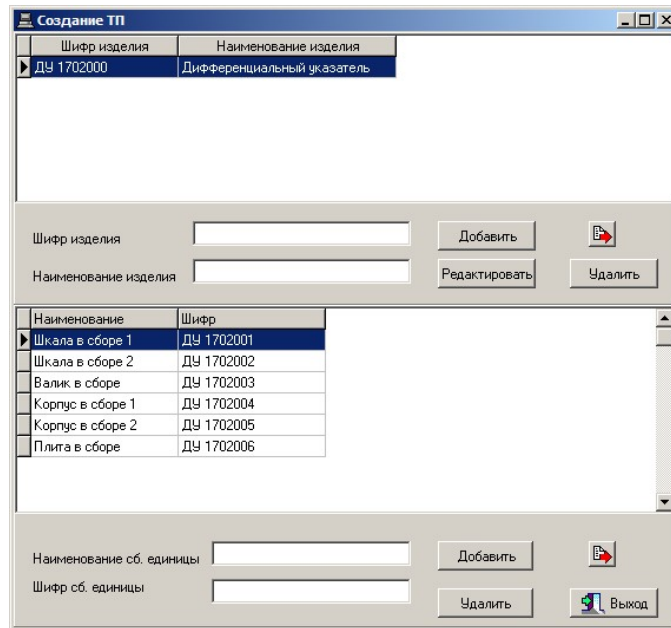


Рис. Н.4. Вікно створення нового технологічного процесу.

В вікні створення нового ТП треба заповнити поля „Обозначение детали” і „Шифр изделия” відповідною інформацією та натиснути кнопку „Создать”. 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 „Открыть ТП” (рис. Н.5). 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 „Создать новую операцию” і натиснути кнопку з надписом „ОК”.

Для створення переходу треба встановити мітку біля пункту „Создать новый переход” і натиснути клавішу „ОК”.

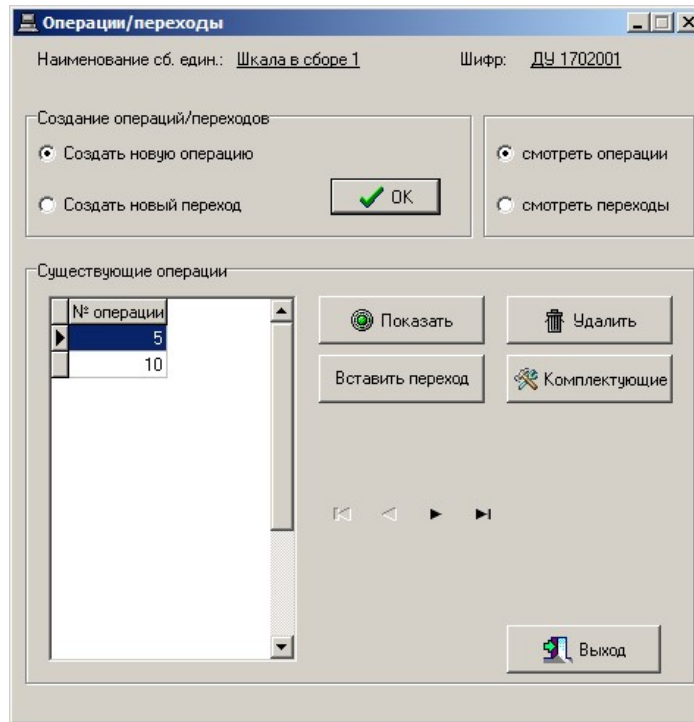


Рис. Н.5. Вікно роботи з операціями та переходами.

У нижній частині цього вікна відображається перелік наявних операцій. Для перегляду вмісту операції необхідно встановити мітку напроти пункту „Смотреть операции», вибрати з переліку необхідну операцію і натиснути на кнопку з надписом „Показать”. Аналогічні дії виконуються для перегляду переходу (мітка встановлюється біля пункту „Смотреть переходы”). 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 „Удалить”. Видалення операції виконується аналогічно (при видаленні операції автоматично видаляються всі переходи, що у неї входять).

Активізація кнопки «Вставить переход» 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. Н.6). Для цього треба виділити необхідну операцію та підтвердити свій вибір, натиснувши на кнопку „ОК”.

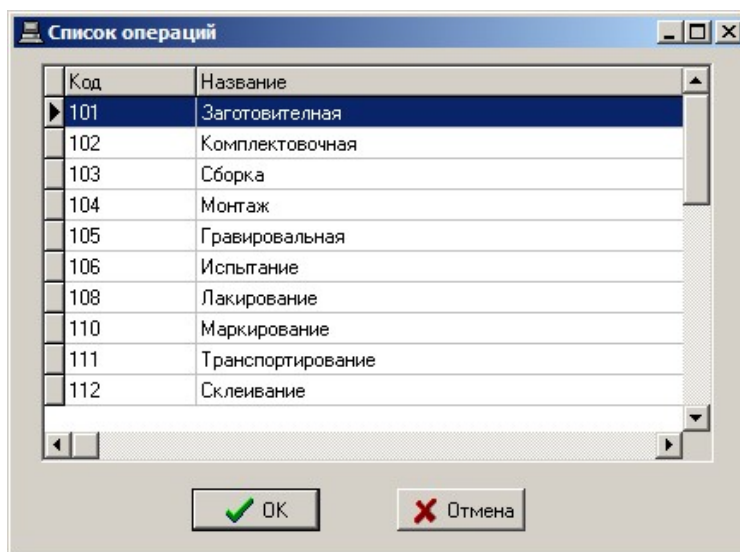


Рис. Н.6. Вікно вибору операції.

Після цього відкривається вікно з полями для запису та редагування змісту операцій (рис. Н.7).

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 „Запись” (альтернативна комбінація клавіш Ctrl+S) і підтвердити збереження запису.

Поля „Приспособления” можуть бути заповнені даними з наявної бази. Щоб викликати список наявних пристосувань та інструментів, необхідно помістити курсор в одне з п'яти полів „Приспособления” і натиснути комбінацію клавіш Ctrl+F2. Після цього відкриється наступне меню (рис. Н.8).

Після підтвердження вибору категорії (кнопка „ОК”) відкриється вікно вибору типу інструменту чи пристосування (рис. Н.9).

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,ГОСТ 13063-67). Вищевказаний формат запису необхідний для коректного відображення пристосувань при формуванні технологічних карт.

Операция
 Сохранить Перейти Удалить Создать Выход

Наименование сб. единицы: Шкала в сборе 1 Шифр: ДУ 1702001

Номер операции: 5 Цех: 3 Участок: 1 Раб. место: 2

Код операции: 1021 Комплектующая

Оборудование: Рабочее место комплектовщика

Приспособление: Ctrl + F2 - вызов базы приспособлений

Комплектующие:

Вспомогательные материалы:

Документы:

Инстр. по ТБ: Комплектующая

Степень мех. Профессия Разряд Усл. труда Кол. раб. 2

КОИД Ед. норм. Объем партии 25 КШТ 3,8 ТПЗ 9,3 ТШТ 2,46

Рис. Н.7. Вікно роботи з операціями.

Для того, щоб здійснити перехід до наступних чи попередніх операцій або переходів необхідно в меню вибрати „Переход → Назад” чи „Переход → Вперед”. Тут можна використовувати гарячі клавіші навігації: F2 – попередній перехід або операція, F3 – наступний перехід або операція.

Категория инструментов / приспособлений

Тип	Наименование
И	Измерительный инструмент
В	Вспомогательный инструмент
П	Приспособления
М	Слесарно-монтажные приспособления
С	Сборочные приспособления
Р	Режущий инструмент

OK Отмена

Рис. Н.8. Вікно вибору пристосувань та інструментів.

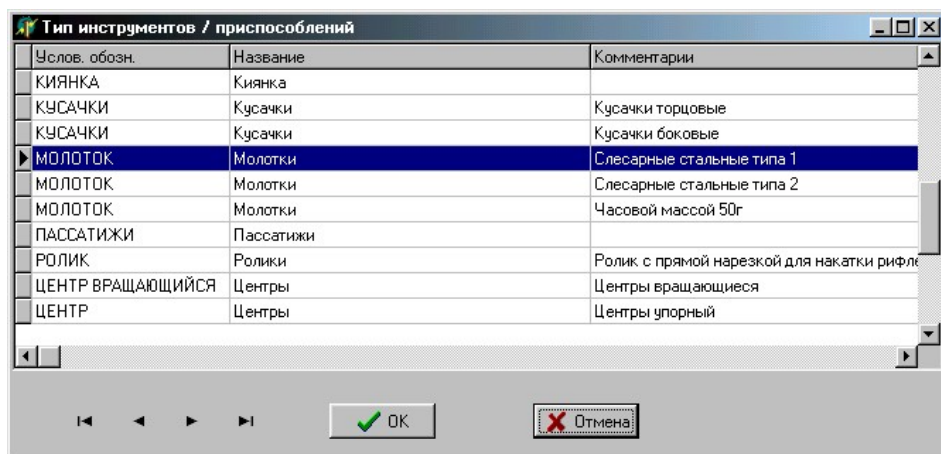


Рис. Н.9. Вікно вибору типу інструменту та пристосувань.

Для видалення операції з проекту необхідно вибрати з меню пункт „Удалить”. При видаленні операції всі переходи, що містяться в ній, також будуть вилучені.

Опція меню „Выход” призведе до переходу з режиму перегляду або редагування операції в перелік наявних операцій і переходів (вікно „Операции / переходы” – рис. Н.6).

Після встановлення покажчика у вікні „Операции / переходы” на розділ “Создать новый переход” буде запропоновано вибрати для якої саме операції створювати перехід (рис. Н.10).

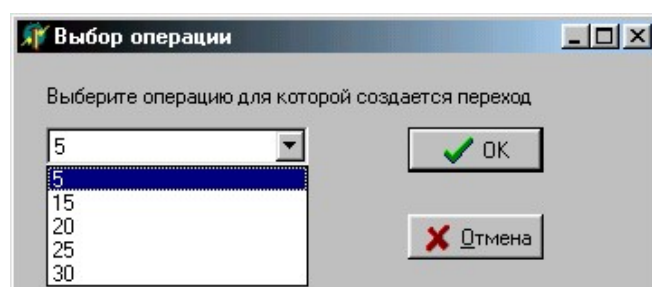


Рис. Н.10. Вікно вибору операції при створенні переходу.

Обравши необхідну операцію натиснути клавішу з надписом „OK”, після чого потрапляємо у вікно списку переходів для кожної окремої операції (рис. Н.11).

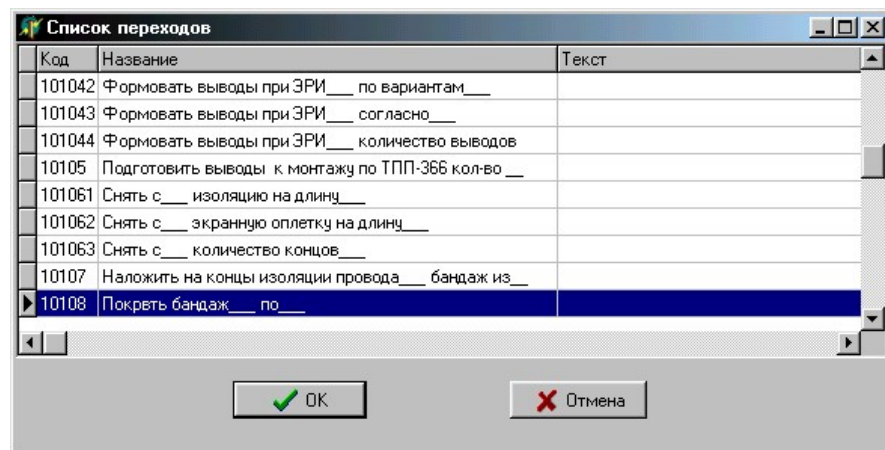


Рис. Н.11. Вікно вибору переходів.

При натисканні клавіші „ОК” на вибраному зі списку переходу відкривається вікно відображення та редагування змісту поточного переходу (рис. Н.12), 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 „Запись” (альтернативна комбінація клавіш Ctrl+S) і підтвердити збереження запису. Після редагування необхідно зробити запис, інакше змінені дані не будуть збережені.

Поля „Инструмент” 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 „Инструмент” 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 И – вимірювальний інструмент, В – допоміжний інструмент тощо), наприклад: И,ЦИРКУЛЬ,7842-0023,ГОСТ 18463-73.

Рис. Н.12. Вікно роботи з переходами.

Для того, щоб здійснити перехід до наступних чи попередніх операцій або переходів необхідно в меню вибрати „Переход → Назад” чи „Переход → 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 „Удалить”. Опція меню „Выход” призведе до переходу з режиму перегляду або редагування переходу в перелік наявних операцій і переходів (вікно „Операции / Переходы” – рис. Н.5).

З меню „Проектирование ТП” (рис. У.4) є можливість виконувати дії експорту та імпорту ТП (рис. Н.13).

Для того, щоб експортувати ТП в окремий файл, необхідно вибрати з переліку необхідний технологічний процес і натиснути кнопку „Экспорт ТП”. Після підтвердження цієї операції необхідно вказати ім'я файлу, в якому розміститься вся інформація поточного технологічного процесу (рис. Н.14).

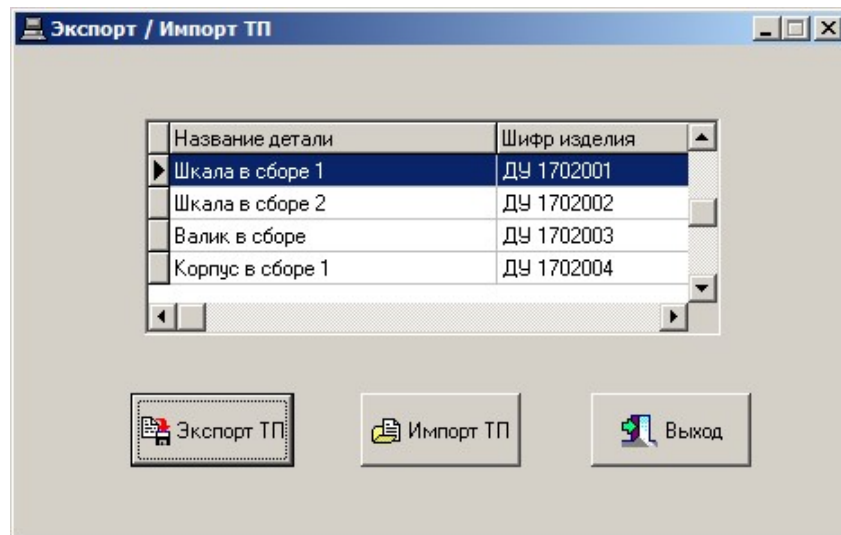


Рис. Н.13. Вікно експорту та імпорту ТП.

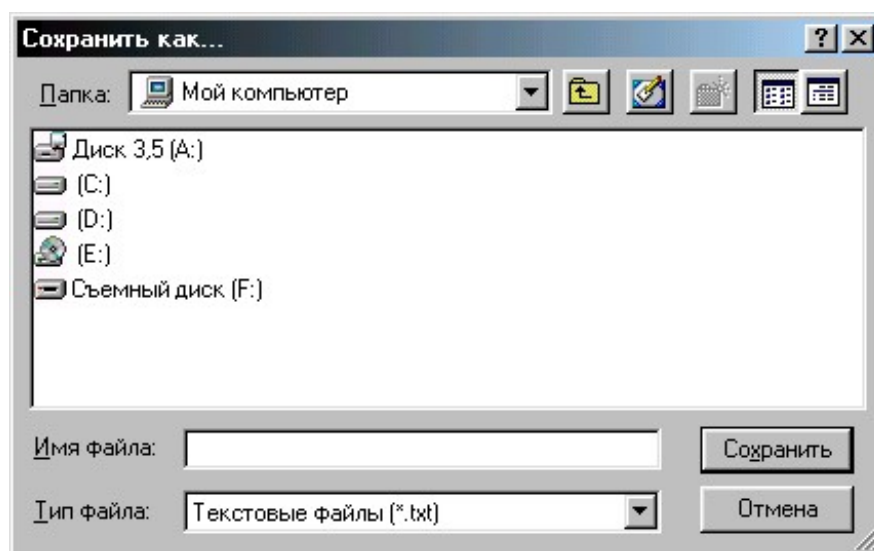


Рис. Н.14. Вікно вказання файлу для експорту ТП.

Для імпортування ТП із файлу необхідно натиснути кнопку з надписом „Импорт ТП”. Далі необхідно вказати файл, у якому знаходиться потрібний ТП (експортований раніше) (рис. Н.15).

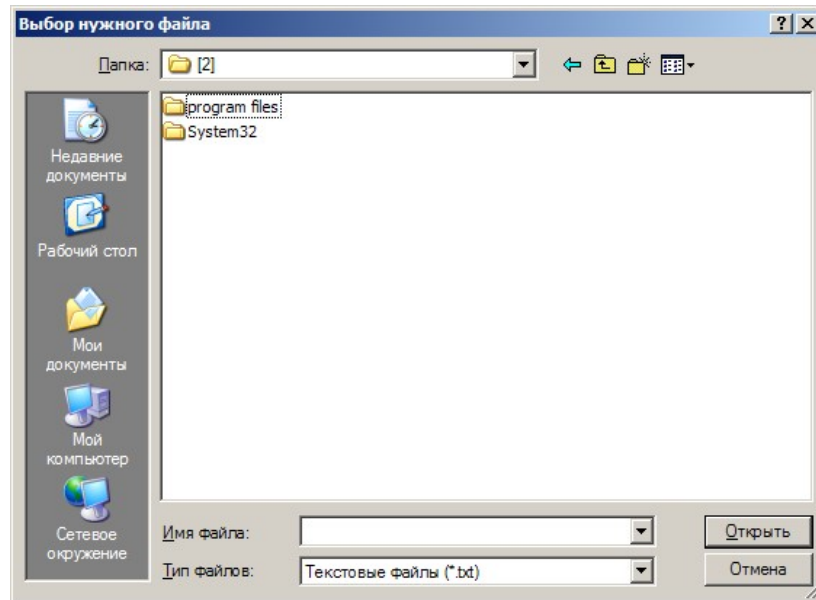


Рис. Н.15. Вікно вибору файлу для імпортування.

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. Н.1) обрати пункт меню „Печать ТП” (рис. Н.16).

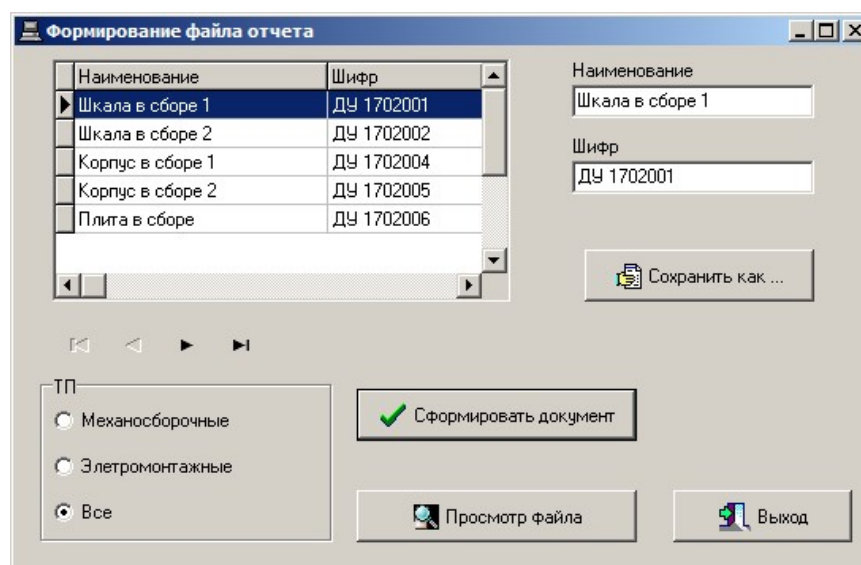


Рис. Н.16. Вікно формування технологічної документації.

Після вибору ТП, для якого необхідно створити документацію, необхідно натиснути кнопку „Сохранить как...” та вказати назву файлу в який буде записано маршрутні карти технологічного процесу, а потім натиснути на кнопку „Сформировать 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 „О программе”).

Наукове видання

Вислоух Сергій Петрович

**Інформаційні технології
в задачах технологічної підготовки
приладо- та машинобудівного
виробництва**

Монографія

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*