

Т. В. Смірнова, К. О. Буравченко, С. С. Кравченко, В. О. Горбов, О. А. Смірнов

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ХМАРНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙ І ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Анотація.** Об'єктом дослідження є процес підтримки прийняття рішень технологічного процесу. Предметом дослідження є система підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин у вигляді хмарного сервісу. Мета роботи полягає в розробці системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин у вигляді хмарного сервісу, що дозволить у подальшому оптимізувати високотехнологічні процеси підприємств різного масштабу з використанням хмарних інформаційних технологій. У результаті дослідження проаналізовано труднощі автоматизації проектування технологічних процесів, пов'язані головним чином з тим, що завдання проектування технологічних процесів не мають в даний час формальних методів вирішення. Тому для здійснення технологічного проектування проведено розробку формалізації технології (або її частини), тобто проведено заміну (перетворення) змістовних пропозицій математичним апаратом. В результаті даної формалізації запропоновано схему руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу. розроблено модель реалізації структури технологічного процесу, для якої визначено основні вхідні параметри: перелік параметрів, які впливають на процес. Також була запропонована структура експертної системи для оптимізації технологічних процесів, проаналізовані методи представлення знань та відповідно розроблено схему потоків інформації під час реалізації даної експертної системи. На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розроблено структуру інформаційної хмарної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів. За допомогою використання розроблених методів та моделей, в результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу за допустимими евристичними правилами, вдалося отримати множини ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих. **Висновки.** Розроблені підходи оптимізації технологічних процесів були застосовані до вирішення задачі оптимізації технологічного процесу електродугової обробки. Спочатку проведено формалізацію технологічного процесу електродугової обробки. Після цього, проведено формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення та відповідно розроблено структури бази знань даного технологічного процесу та діаграма використання розробленої інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень; технологічні процеси; хмарні сервіси.

### Вступ

Сучасні високотехнологічні підприємства можуть сягати дуже великих розмірів, а і відповідно технологічні процеси, які на них забезпечуються, можуть мати дуже складні розгалужені структури. В залежності від типу виробництва, наявної інфраструктури, використовуваних методів тощо комплексний опис, реалізація та моніторинг технологічних процесів може бути дуже складною задачею, для вирішення якої необхідно застосовувати різноманітні методи дослідження. Зважаючи на це, можна виділити дуже перспективний напрям щодо оптимізації високотехнологічних процесів, а саме використання хмарних інформаційних технологій для оптимізації виробничих процесів підприємств різного масштабу. Проте все одно залишається ряд невирішених проблем під час використання хмарних технологій для оптимізації виробничих процесів, що пов'язані із формалізацією самих виробничих процесів, вибором методів оптимізації, моніторингом всіх процесів, захистом даних щодо виробничих процесів тощо.

Тому метою даної роботи є розробка моделі системи підтримки технологічних процесів з використанням хмарних технологій.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі вирішувались такі задачі:

1. Формалізація узагальненої проблеми підтримки технологічних процесів.

2. Удосконалення моделі реалізації структури технологічного процесу.

3. Удосконалення структурної моделі інформаційної хмарної системи підтримки технологічних процесів.

4. Побудова структурної хмарної системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу та її прикладне застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні високотехнологічні підприємства можуть сягати дуже великих розмірів, й відповідно технологічні процеси, які на них забезпечуються, можуть мати дуже складні розгалужені структури [1, 2, 7, 10, 16]. В залежності від типу виробництва, наявної інфраструктури, використовуваних методів тощо комплексний опис, реалізація та моніторинг технологічних процесів може бути дуже складною задачею, для вирішення якої необхідно застосовувати різноманітні методи дослідження. Зважаючи на це, можна виділити дуже перспективний напрям щодо оптимізації високотехнологічних процесів, а саме використання хмарних інформаційних технологій для оптимізації виробничих процесів підприємств різного масштабу. Проте все одно залишається ряд невирішених проблем під час використання хмарних технологій для оптимізації виробничих процесів, що пов'язані із формалізацією самих виробничих процесів, вибором методів оптимізації, моніторингом всіх процесів, захистом даних щодо виробничих процесів тощо. У

роботах [1, 6] розглянуто хмарну автоматизовану систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів, та визначено область застосування таких систем. Роботи [2, 7, 12, 14, 16] обґрунтовують застосування систем підтримки прийняття рішень для реалізації технологічних процесів. Використання у задачах даного класу експертних систем обґрунтовано у роботах [3, 5, 15, 16]. Опис технологічних операцій для різних технологічних процесів наведено у роботах [4, 7, 10, 13]. Формування баз даних та баз знань для відповідних систем обґрунтовані у роботах [5, 8].

Таким чином проведений аналіз підтверджує необхідність розробки системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу у вигляді хмарного сервісу, для практичного застосування у розроблювальних у подальшому системах автоматизації процесів формування та відновлення деталей.

**Мета роботи:** полягає в розробці системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин у вигляді хмарного сервісу, що дозволить у подальшому оптимізувати високотехнологічні процеси підприємств різного масштабу з використання хмарних інформаційних технологій.

### Формалізація проблеми підтримки технологічних процесів

У процесі автоматизації проектування технологічних процесів відбувається переробка великих обсягів інформації. Ефективність процесу проектування багато в чому залежить від раціонального подання вихідної інформації, і в першу чергу з точки зору її повноти і надмірності. Вихідну інформацію для проектування технологічних процесів поділено на базову, керівну і довідкову. Базова інформація для проектування технологічних процесів включає:

- дані, що містяться в конструкторській документації на виріб;
- програму випуску, визначаючи тип виробництва;
- відомості про наявність технологічного оснащення, виробничих площ і т.п. (при проектуванні технологічних процесів для діючих заводів і цехів).

Керівна інформація включає дані, які містяться в таких джерелах:

- відповідних галузевих стандартах і стандартах підприємства на технологічні процеси, методи управління ними, технологічне оснащення (обладнання, пристосування та ін.);

- документації на перспективні технологічні процеси;

- виробничих інструкціях.

Довідкова інформація включає дані, які містяться в:

- документації на діючі типові технологічні процеси по даному виду обробки;
- описах прогресивних методів обробки;
- каталогах, номенклатурних довідниках прогресивного технологічного обладнання і оснастки;
- матеріалах щодо вибору технологічних нормативів (режимів обробки, припусків, норм витрати матеріалів і ін.);

- планах підвищення технічного рівня виробництва;

- методичних матеріалах по керівництву розрахунками точності процесів обробки;

- матеріалах і трудових нормативах (в тому числі машинобудівний і галузевих нормативах часу для нормування технологічної трудомісткості, тарифно-кваліфікаційних довідниках тощо).

Труднощі автоматизації проектування технологічних процесів (ПТП) пов'язані головним чином з тим, що завдання ПТП не мають в даний час формальних методів вирішення. Так, завдання вибору маршрутного технологічного процесу при її описовому викладі не містить даних про методи проектування процесів виготовлення складних деталей, які могли б бути представлені математичними операціями, реалізованими у вигляді програмного забезпечення. Крім того, вибір послідовності дій і засобів для виготовлення деталі не може бути виведений математичним чином на основі вихідних даних.

Для сучасних розробок технологічних процесів характерно:

- відсутність строгих аналітичних залежностей;
- складна логіка суджень, складний взаємозв'язок і взаємний вплив окремих завдань;

- наявність величезних інформаційних потоків і великої кількості складових елементів технології (верстати, пристосування, інструмент, режими обробки і ін.).

Процес «ручного» проектування технологічних процесів є послідовністю дій, за допомогою яких інженер-технолог вибирає елементи з розглянутих масивів різних технологічних предметів, встановлює між ними відповідності, формуючи переходи і технологічні операції. Вибір оптимального процесу проводиться технологом шляхом порівняння варіантів процесів при введенні оцінок на елементи, його складові.

Рішення будь-якої задачі за допомогою комп'ютерної техніки вимагає наявності аналітичних або інших видів залежностей, що відображають кількісний, а не якісний бік процесу проектування. Тому для здійснення технологічного проектування необхідно провести формалізацію технології (або її частини), тобто провести заміну (перетворення) змістовних пропозицій математичним апаратом.

Метою формалізації є забезпечення можливості створення універсальних алгоритмів і програм щодо початкових і кінцевих умов, тобто щодо форми і розмірів деталей, характеру виробництва, характеристик устаткування і оснащення, проектуванні різних технологічних процесів для деталей різних класів і будь-якої складності.

Формалізація завдання перетворює процес технологічного проектування з процесу міркувань і побудови аналогій в процес суворого розрахунку. При цьому форма побудови технологічного процесу і його складових елементів може бути виражена за допомогою апарату математичної логіки, зміст технологічних процесів, що характеризується рядом властивостей об'єктів технології, описано засобами теорії множин, а якісні співвідношення представлені кількісними залежностями за допомогою логічних функцій.

## Принципи формалізації завдання вибору

Проектування і оптимізація технологічних процесів є складним завданням, оскільки вимагає врахування великої кількості факторів, що впливають на результати процесу. Велике число факторів не дозволяє отримати строгі функціональні залежності для вибору методу і розрахунку оптимальних технологічних параметрів. Це завдання може бути вирішено двома шляхами.

Перший шлях – застосування типових технологічних рішень. На практиці, з метою забезпечення вибору методу обробки користуються переліком методів, застосовуваних для обробки типових поверхонь або типових деталей. При цьому звужується кількість груп розглянутих методів, але необхідна подальша конкретизація критеріїв для подальшого звуження кола об'єктів вибору.

Другий шлях – створення автоматизованого банку методів оптимізації для пошуку і вибору з використанням цифрових технологій. Під таким банком маються на увазі всі цифрові бази даних – відомі методи оптимізації технологічних процесів з перерахуванням їх технологічних параметрів і також стандартні програми, що допускають оновлення і необхідну обробку наявної інформації.

### Облік розсіювання конструкторсько-технологічних параметрів

На практиці зазвичай на найбільш важливі параметри встановлюється номінал в середині поля допуску. Але це інтуїтивне рішення є апіорно оптимальним лише в тому вельми окремому випадку, коли одночасно має місце:

а) симетричний (по відношенню до номіналу) закон розподілу відхилень параметра;

б) однакова (симетрична по відношенню до центру допуску) ціна придатної продукції і однакова вартість продукції, що виходить за межі допуску.

Практично, в дуже великій кількості реальних випадків має місце несиметричний розподіл ціни результату. У всіх цих випадках підлягає дослідженню питання про доцільність зміщення номіналу щодо середини допуску, тобто зміщенні, що створює найбільше математичне сподівання ціни результату. Метод оптимуму номіналу [9] дозволяє для будь-якого відомого закону розподілу відхилень і заданого розподілу цін результату визначити таке зміщення номіналу від середини поля допуску, яке дає найбільше значення математичного очікування ціни результату – найбільшу інтегральну споживчу ефективність  $U_i(X)$ .

Сукупність усіх методів, використовуваних для технологічних процесів, виробничою системою  $P$ , можуть бути використані для об'єктів обробки  $A$ . Якщо об'єкт  $A$  розглядається як неструктурований, то його модель включає в себе безліч  $F(A)$  контурів (необхідних властивостей) і набір відносин між ними, що описуються булевою матрицею контурів  $[A \times F(A)]$  оброблюваного об'єкта [12].

При моделюванні впливу системи  $P$  на об'єкт  $A$  математична модель системи  $P$  називається моделлю виробничого середовища (системи), що включає в

себе безліч  $F(P)$  контурів (властивостей), що досягаються системою, і набором відносин між ними, представлених булевою матрицею контурів  $[P \times F(P)]$  елементів системи і булевою матрицею  $[P \times P]$  взаємозв'язку елементів  $P$ . Для здійснення технологічного процесу об'єкта  $A$  зі складом контурів  $F(A)$  в системі  $P$  необхідно, щоб:

$$F(A) \subseteq F(P) \quad (1)$$

або на логічному рівні опису:

$$F(A) = F(P) \wedge F(A). \quad (2)$$

Модель виробничого середовища у вигляді автоматизованого банку знань і банку даних методів можна використовувати для вирішення різних задач, в тому числі для вирішення прямої і зворотної задачі технологічного проектування.

При вирішенні прямої задачі на вхід моделі надходять дані по контурах (необхідні властивості) об'єкта обробки  $F(A_i)$ ; на виході отримують набір контурів  $F(P_i)$  і елементів  $P_i$  виробничої системи, що беруть участь в забезпеченні контурів (необхідних властивостей) об'єкта  $A_i$ , при цьому буде досягнутий повний склад контурів об'єкта  $F(A_i)p \subseteq F(P_i)$ . Очевидно, якщо  $F(A_i)p = F(P_i)$ , то виконуються умови (1) і (2), і об'єкт може бути виготовлений в даній виробничій системі.

Зворотне завдання технологічного проектування, що вирішується за допомогою тієї ж моделі виробничої системи; на відміну від прямої задачі полягає в тому, що входом є набір  $P_j$  елементів виробничої системи, а виходом – склад контурів  $F(P_j)$ , що характеризують контури всіх можливих об'єктів  $A$ , які можуть бути реалізовані в заданій виробничій системі. Розглянуті теоретичні підходи [13] створюють можливість для розробки алгоритмів інтелектуальної системи підтримки прийняття рішення (САПР) при виборі методів для технологічних процесів в інтегрованих САПР. За допомогою модуля логічного виведення (МЛВ) і модуля прийняття рішень (МПР) при взаємодії з САПР КІ здійснюється вибір виду та методу для забезпечення виробничих процесів, а при взаємодії з САПР ТП – вибір, проектування та інформатизація виробничих процесів. При вирішенні цих завдань МЛВ використовує банк знань БнЗн і банк конструкторсько-технологічних даних БнКТД. Формування банку знань здійснюється експертами за допомогою блоку формалізації знань (БФЗн).

Таким чином інтелектуальна систем підтримки прийняття рішення дозволяє зробити вибір методу технологічного процесу, що має найменшу собівартість режимів роботи, що дозволяють забезпечити необхідні параметри якості, а головне дає можливість вирішувати прямі і зворотні завдання технологічного проектування.

### Загальна постановка задачі забезпечення процесу оптимізації технологічних процесів виробництва

Оптимізація технологічних процесів допомагає зробити найбільш ефективний вибір оптимального

варіанта в конкретній ситуації. Головними завданнями розрахунків при цьому виступають наступні:

1. Вибір оптимального критерію.
2. Визначення параметра, який буде впливати на результативність ТП.
3. Розробка  $F = F(X)$  в залежності від існуючих умов моделі (наприклад, якщо визначальним параметром стала найменша собівартість, то в даному випадку цільовою буде залежність від наявних параметрів).
4. Пошук оптимального рішення з обчисленням екстремуму, знаходженням найбільш підходящого для конкретної ситуації технологічного процесу.

При цьому, види оптимізації ТП (технологічних процесів) включають в себе параметричні і структурні робочі методи. Перша група – це зміна наявних значень при певній структурі, наприклад, розрахунок оптимального складу режиму використання устаткування. Щоб вирішити такі завдання, необхідно використання нелінійного або лінійного математичного програмування.

Структурна оптимізація процесу проектування пов'язана з підбором структури, вона працює за принципом виключення варіантів за рахунок наступного:

- втручання в уже здійснене проектування з метою пошуку найкращого і результативного рішення з певної точки зору і відповідно до заданих значень;
- уніфікація обраних варіантів.

Оптимізація параметрів для технологічного процесу вирішує завдання вибору методу, при якому найменші витрати на обчислення дадуть найбільш інформативний об'єм про необхідний процес.

Процеси знаходяться в прямій залежності від того, які саме методи будуть застосовані в роботі при пошуку найбільш результативного рішення для конкретної ситуації.

Оптимізація для технічних процесів застосовується для вибору оптимального варіанту з наявних, тобто фактично виконується пошук екстремуму для  $F(X)$  за допомогою варіювання наявних проектних (заданих попередньо) значень для  $X$  в межах наступної області допущення:  $extr F(X), X \in D_x$ , при цьому використовуються наступні параметри:  $F(X)$  – використовувана функція;  $X$  – вектор змінних;  $D_x$  – допустима робоча область  $X$ . Вибором може бути найменша собівартість, тобто найменші фінансові витрати, максимально можлива продуктивність при заданих умовах з найменшим часом, необхідним для виготовлення однієї одиниці.

Методи оптимізації технологічних процесів можуть використовувати один або кілька критеріїв, тобто можливо застосовувати різні параметри, багатокритеріальну оптимізацію. При цьому створюється один компромісний критерій, що враховує одразу декілька вибраних параметрів, так званих  $E_i$  – локальних критеріїв ( $E_1, E_2, E_3, \dots, E_r$ ). Для кожного такого критерію можливе вирішення завдань оптимізації розробки технологічних процесів, після чого проводиться обчислення екстремального значення для  $E_i$  (при  $i$ , що дорівнює 1, 2, 3, ...,  $r$ ).

Рівняння відхилення для критерію можливо записати таким чином:

$$Q_i = E_i - E_i^* .$$

Окремо для кожного з них слід обчислити ваговий коефіцієнт  $\lambda_i (0 < \lambda_i < 1 \quad i \quad \sum \lambda_i = 1)$ , що необхідно для визначення важливості параметра в рамках технологічного процесу. Для запису компромісного критерію застосовується адитивна функція  $Q = \sum Q_i \lambda_i$ . Тільки після цього вирішується оптимізація параметрів процесу. Для вирішення можуть застосовуватися різні методи, включаючи імітаційні, аналітичні, комбіновані.

Аналітичні методи оптимізації технологічного процесу виробництва припускають застосування засобів математичного програмування.

Імітаційна оптимізація управління технологічними процесами передбачає роботу в реальних умовах, створення імітаційної моделі, основа якої дає можливість вибрати найкращий варіант ТП. При оцінках застосовуються способи виключення, вибору відповідної моделі, що дозволяє досягти заданого критерію. Комбінований метод передбачає використання окремих зазначених прийомів, об'єднання аналітичного і імітаційного методів в один, що дозволяє досягти оптимального результату. Такий спосіб застосовується при певних умовах і необхідності отримання найбільш точного результату.

В якості прикладу розглядається схема руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу. Для обраної схеми є доцільним проведення оптимізації для ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно ваговій функції. Кожна технологічна операція повинна відокремити такі вектори величин:  $\bar{X}$  – контрольовані величини процесу, для цих величин існують обмеження;  $x_{\min,i} \leq x_i \leq x_{\max,i}$ ;  $\bar{V}$  – відомі але не контрольовані величини процесу;  $\bar{Z}$  – невідомі та не контрольовані величини;  $\bar{R}$  – випадкові величини, що впливають на процес;  $\bar{Y}$  – параметри, які досягаються в процесі технологічної обробки. Для вказаних величин технологічного процесу є рівняння, де параметри процесу  $\bar{X}$  є шуканою величиною:

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{V}, \bar{Z}, \bar{R}), \quad (3)$$

Однак для технологічного процесу, який складається з ланцюга технологічних операцій, рівняння (3) перетворюється в систему рівнянь:

$$\begin{cases} \bar{Y}_k = F_k(\bar{X}_k, \bar{V}_k, \bar{Z}_k, \bar{R}_k), \\ \bar{Y}_{k-1} = F_{k-1}(\bar{X}_{k-1}, \bar{V}_{k-1}, \bar{Z}_{k-1}, \bar{R}_{k-1}), \\ \dots \\ \bar{Y}_1 = F_1(\bar{X}_1, \bar{V}_1, \bar{Z}_1, \bar{R}_1), \end{cases} \quad (4)$$

де результати попередньої технологічної операції можуть бути частково або повністю входити як параметр наступної технологічної операції, тобто:

$$\bar{X}_i \cap \bar{Y}_{i-1} \neq \emptyset .$$

На практиці невідомі та випадкові параметри не враховують, або допускають їх використання, як випадкові величини. У разі наявності переліку таких випадкових параметрів, визначити межі зміни керованих величин за допомогою методів або аналітичного оцінювання відхилення результату, або використавши повно факторний експеримент, при змінюванні лише величин, які входять до  $\bar{Z}$  та  $\bar{R}$ .

### Модель реалізації структури технологічного процесу

Складність технічних систем, що моделюються, значною мірою залежить від різноманіття номенклатури об'єктів вимірювання, наявних вимірювальних приладів і систем та багатьох інших умов. При цьому завжди намагаються використовувати такі технологічні процеси, за допомогою яких можна досягати найбільшої продуктивності праці за найменшою собівартості та високої якості продукції в умовах певного підприємства. До системного аналізу входять:

1. Постановка задачі, яка включає визначення кінцевих цілей та питання, що потребують вирішення умов, в яких функціонує система, визначення обмежень, що накладаються на умови функціонування системи та ін.

2. Дослідження: визначення, аналіз і узагальнення даних, необхідних для розв'язання задачі, визначення структури системи (проблеми), що аналізується, установлення зв'язків, виявлення методів та дій для розв'язання задачі.

3. Аналіз, що охоплює побудову моделей, вибір критеріїв ефективності їх використання для передбачення наслідків того чи іншого курсу дій, зіставлення різних варіантів рішень щодо цих наслідків.

4. Попереднє судження зводиться до вибору найоптимальніших шляхів досягнення мети, формулювання висновків та розроблення рекомендацій щодо подальших дій.

5. Експериментальна перевірка ухвалених рішень, результатів аналізу.

6. Заключне судження – заключний вибір найоптимальнішого варіанта вирішення завдання на підставі експериментальної перевірки результатів аналізу.

7. Реалізація ухваленого рішення, що включає доведення ухваленого рішення до конкретних результатів: креслень, технологій, організаційних заходів тощо.

В загальному випадку, вхідними параметрами до моделі реалізації структури технологічного процесу є: перелік параметрів, які впливають на процес; перелік параметрів, які є результатом процесу; перелік керованих параметрів; перелік некерованих параметрів; перелік невідомих параметрів; деталізована структура технологічного процесу з розділенням параметрів та результатів.

### Абстрактний технологічний процес, його властивості та методи переходу до конкретного технологічного процесу

Технологічний процес складається з ланцюга окремих технологічних операцій, кожна з яких через різні причини може бути замінена на технологічну

операцію на іншій основі, але аналогічну за отриманим результатом. Для будь-якого етапу обробки характерна технологічна спадковість, коли використання обробки обмежується за рахунок умов, накладені попередньої використаної операцією. Проблемою є часткова технологічна спадковість, коли такі операції частково перекривають кілька попередніх, що значно ускладнює повний граф можливих ланцюгів проведених операцій.

Для оптимізації технології по ланцюгу технологічного процесу використовують експертні системи, де такі позначення:

– експерт – фахівець з даної технологічної операції;

– інженер знань – фахівець, який формалізує знання експертів, відповідає за процес отримання знань і надання їх до бази знань експертної системи;

– база знань – множина доступних знань щодо обраної технологічної операції;

– система інтелектуального рішення – ключовий елемент експертної системи, який на основі наявних знань і вхідних параметрів поставленого завдання надає параметри технологічного процесу з оптимізацією заданими критеріями (час роботи, доступні матеріали, сукупні грошові витрати);

– інтерфейс користувача відповідає за взаємодію між комп'ютерними системами і людиною.

### Інформаційна модель технологічного процесу і методи її одержання

В процесі побудови експертних систем оптимізації технологічного процесу необхідно пройти наступні етапи:

1. Визначення вхідних / вихідних даних.

2. Розробка словника атрибутів, які притаманні обраній технологічній операції.

3. Виявлення об'єктів і понять.

4. Виявлення зв'язків між вхідними керованими і некерованими параметрами технологічних операцій.

5. Визначення цілей оптимізації.

6. Визначення стратегій вибору параметрів технологічної операції для досягнення поставлених оптимізаційних задач.

Виникає потреба у функціональному пов'язування вхідних даних і певних некерованих величин з параметрами, необхідними від технологічного процесу.

Побудова експертної системи вимагає наявності співвідношень для знаходження параметрів, які оптимізуються, наприклад, грошові витрати, час обробки і витрачений вихідний ресурс відповідно:

$$G(\bar{Y}), T(\bar{Y}), E(\bar{Y}). \quad (5)$$

Для технологічного процесу (5) на основі математичної моделі і розрахунку витрат на його виконання наводиться експертна система оптимізації технологічного процесу.

Схема передбачає наявність ітераційного пошуку методом поступового поліпшення результату з початкового допустимого режиму роботи системи. Для більш надійного результату, при наявності значної нелінійності, такий процес можна проводити з кількох початкових точок.

Таким чином можна перерахувати наступні складові інформаційного забезпечення функціонування експертної системи у вигляді хмарного сервісу.

1. База знань, яка містить: дані експериментів, допустимі діапазони вхідних даних, список вхідних параметрів, список вихідних параметрів, методи і математичне забезпечення розрахунків витрат на процес.

2. Система отримання вимог до результатів відновлення і критерій (або критерії) оптимізації.

3. Система пошуку екстремумів в багатовимірному просторі.

4. Система перевірки на досягнення результату.

5. Система виявлення «зацикленості» пошуку рішень у випадках недосяжності поставлених вимог.

6. Система введення неконтрольованих вхідних параметрів.

7. Система забезпечення інформаційного потоку між компонентами експертної системи з урахуванням синхронізації і взаємних блокувань.

### Формалізація структури та правил технологічного процесу, зведення до універсального технологічного процесу

Структура управління виробничої інформацією повинна підтримувати користувача в діяльності з моделювання виробництва і постачати інструменти підтримки прийняття рішень необхідною інформацією.

В процесі формування структури технологічного процесу потрібно визначити низку параметрів, які не регламентуються вимогами до готового виробу, але їх значення суттєво впливають на результат планування технологічних операцій. Також, не регламентовані вимоги не можуть бути виражені ні математично або алгоритмічно, і виводяться з власного досвіду експертів. Хмарна інформаційна система забезпечення проектування технологічного процесу повинна забезпечити правильність заповнення вимог до результатів технологічного процесу. Тут система повинна забезпечити контроль повноти та сумісності вхідних даних, проводити контроль наявності вимог, які не можна визначити із вже заданих критеріїв. Також система повинна забезпечити можливість залишити вимогу невизначеною, якщо з вже визначених величин можлива оцінка цієї вимоги.

Особливе значення має можливість для обов'язкових вимог встановлювати критерії максимальності або мінімальності, при одночасному задоволенні інших критеріїв. Деякі вхідні параметри та вимоги мають характер визначення підмножини з доступних елементів. Очевидним критерієм вимог до результату технологічного процесу є можливість задання граничних критеріїв.

На основі математичного співвідношення (5) і діаграми потоку інформації в узагальненій експертній системі технологічного процесу приведено приклад формалізації підмножини абстрактних експертних систем оптимізації технологічних процесів. Для цього використано такі позначення множин, які формують базу знань для ряду технологічних процесів:  $S = \langle X, Y, V, M, P, D, G \rangle$ , що включає операцію виділення підмножин елементів, що стосуються

окремої технологічної операції  $k$ :  $X_k$  – множина керування параметрів технологічного процесу  $k$ .  $Y_k$  – множина параметрів деталі, які контролює або змінює технологічний процес  $k$ .  $V_k$  – множина параметрів, які не справляються, але які необхідно враховувати при виконанні технологічного процесу  $k$ .  $M_k$  – множина методів отримання математичної моделі технологічного процесу  $k$ .  $P(m), m \in P(M_k)$  – обраний екземпляр з методів оптимізації, який можна застосувати для зазначених математичних моделей,  $P$  – операція вибору методу з множини методів. Операція вибору може проводитися автоматично або по вибору розробника експертної системи.  $D_k$  – множина функцій розрахунку матеріальних, в т.ч. і часових, витрат на здійснення технологічного процесу  $k$ , за якими може проводитися процес оптимізації. Сюди ж входять лінійні або більш складні комбінації для отримання остаточної багатофакторної вагової оптимізаційної функції.  $G_k$  – множина матеріальних ресурсів, використуваних у технологічному процесі. Знаком вектора, як це зроблено в попередньому пункті, на відповідних позначеннях визначалися конкретний кортеж реальних величин, які відповідають безлічі обраних величин і характеристик. Тоді отримаємо такі співвідношення для окремого технологічного процесу  $k$ :

$$\begin{cases} \bar{X}_k = m(\bar{Y}_k, \bar{V}_k, \bar{Y}_{k-1}, \bar{G}_k); \bar{G}_k = D_k(\bar{Y}_k, \bar{V}_k); \\ |\bar{G}_k| \rightarrow \min; |\bar{G}_k| = \infty, \text{ якщо } \bar{Y}_{k-1} \notin \bar{Y}_k. \end{cases} \quad (6)$$

Сукупність технологічних процесів  $S$  і формують формальне завдання безлічі технологічних процесів. Додавання до бази знань нового технологічного процесу супроводжується такими операціями:

$$\{S = S \cup S_k, S_k = \langle X_k, Y_k, V_k, M_k, P_k, D_k, G_k \rangle,$$

де  $k$  – номер доданого до системи технологічного процесу.

Формалізація рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга технологічних процесів як надбудови експертної системи над експертними системами окремих технологічних процесів вимагає використання послідовності технологічних процесів. Наприклад, деталь з параметрами  $Y_k$  після кожного з технологічних процесів обробки має вигляд  $Y_{k-1}$  згідно введеним позначенням. Це формує ланцюг технологічних операцій

$$Y = \sum_{(k)} \bar{Y}_k, \quad (7)$$

де  $k \in$  екземпляром комбінаторної конфігурації з доступних технологічних процесів, а  $(k-1)$  позначає попередній технологічний процес.

На основі (7) можна проілюструвати цикл обробки як граф доступних процесів.

### Структурна модель інформаційної хмарної системи підтримки технологічних процесів

Структурно вся інформаційна система  $S$  і кожна з її підсистем можуть бути описані в такому вигляді:

$$S = I \{S_i\}, i = 0, 1, \dots, k, \quad (8)$$

де функція  $I$  – множина інформації, яка описує інформаційну систему як цілісну систему, що складається із  $S$ ;  $S_i$  – множина підсистеми  $S$ .

Будь-яка підсистема  $S$ , знову ж може бути представлена і вигляді:

$$S = I \{S_{ij}\}, i = 0, 1, \dots, k, \quad (9)$$

де:  $I_i$  – множина інформації, яка описує підсистему  $S_i$  як цілісну систему, що складається із  $S_{ij}$ ;  $S_{ij}$  – множина підсистеми  $S_i$ .

Цей процес структуризації повинен продовжуватися до тих пір, поки на деякому кроці множина підсистеми  $S_{ij}$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$  не виявиться пустою.

Дану структуризацію можна уявити у вигляді графу, де вузол описується двома параметрами ( $I_{ij}K_k$ ,  $S_{ij}K_k$ ), а зв'язки – матрицею суміжності.

У відповідності до (8), (9), структурну модель технологічного середовища (ТС) опишемо у вигляді:

$$TC = \{I^T, MT\},$$

де:  $I^T$  – множина інформацій, яка описує технологічне середовище як цілісну систему;  $MT$  – множина складових технологічного середовища.

Множина  $MT$  може бути описана у вигляді:  $MT = \{T_i \in I^T\}$ , де  $T_i$  – територіально-локалізовані складові технологічного середовища.

Множина  $T_i$  може бути описана у вигляді:  $T_i = \{A_i, P_i\}$ , де:  $A_i$  – множина апаратних засобів,  $i$ -ого ТС;  $P_i$  – множина програмних засобів,  $i$ -ого ТС.

Множина  $A_i$  може бути описана у вигляді:  $A_i = \{I_i^A, \{O_i, P_{ri}, C_i, t_{ri}, D_i\}\}$ , де  $I_i^A$  – множина інформації, яка описує апаратні засоби  $i$ -ого ТС як єдине ціле;  $O_i$  – множина засобів створення і обробки інформації;  $P_{ri}$  – множина засобів відображення і опису інформації;  $C_i$  – множина засобів управління інформацією;  $t_{ri}$  – множина засобів передачі інформації;  $D_i$  – множина засобів збереження інформації. Множина  $O_i$  може бути інтерпретована як множини комп'ютерів даного ТС.

Множина  $P_{ri}$  може бути описана у вигляді:  $P_{ri} = \{Dis_i, Din_i, Print_i, Pl_i\}$ , де  $Dis_i$  – множина дисплеїв даного ТС;  $Din_i$  – множина динаміків даного ТС;  $Print_i$  – множина принтерів даного ТС;  $Pl_i$  – множина плотерів даного ТС.

Множина  $C_i$  може бути описана у вигляді:  $C_i = \{Pc_i, M_i, Km_i\}$ , де  $Pc_i$  – множина можливих пультів управління;  $M_i$  – множина маршрутизаторів;  $Km_i$  – множина комутаторів.

Множина  $t_{ri}$  може бути описана у вигляді:  $t_{ri} = \{Kn_i, md_i, int_i, K_{Ti}\}$ , де  $Kn_i$  – множина каналів зв'язку;  $md_i$  – множина модемів;  $int_i$  – множина інтерфейсів;  $K_{Ti}$  – множина концентраторів.

Множина  $D_i$  може бути описана у вигляді:  $D_i = \{d_i, bnf_i, op_i\}$ , де  $d_i$  – множина довгочасно запам'ятовуючих пристроїв;  $op_i$  – множина оперативно

запам'ятовуючих пристроїв;  $bnf_i$  – множина буферних накопичувачів.

При необхідності деталізація запропонованих структур може бути продовжена. Множина програмних засобів  $i$ -го ТС може бути описана у вигляді:

$P_i = \{I_i^P, \{F_i, S_i, N_i\}\}$ , де  $I_i^P$  – множина інформації, яка описує програмні засоби  $i$ -ого ТС як цілісної системи;  $F_i$  – множина функціональних програм;  $S_i$  – системне програмне забезпечення;  $N_i$  – мережне програмне забезпечення.

Множина  $F_i$  може бути представлена у вигляді:  $F_i = \{F_i^i, F_i^o, F_i^p, F_i^g, F_i^3\}$ , де  $F_i^i$  – множина функціональних програм які виконують інформаційні функції;  $F_i^o$  – множина функціональних програм, які можуть виконувати функції обробки інформації;  $F_i^p$  – множина функціональних програм, які можуть виконувати функції представлення інформації;  $F_i^g$  – множина функціональних програм, які можуть обробляти графічну інформацію;  $F_i^3$  – множина функціональних програм, які можуть обробляти звукову інформацію.

Множина  $S_i$  може бути описана у вигляді:  $S_i = \{S_i^{on}, S_i^c, S_i^d, S_i^t\}$ , де  $S_i^{on}$  – операційні системи АРМ;  $S_i^c$  – множина СУБД  $i$ -ого ТС;  $S_i^d$  – множина програмних засобів захисту інформації;  $S_i^t$  – множина програмних засобів сервісного обслуговування і тестування.

Множина  $N_i$  може бути описана у вигляді:  $N_i = \{C_i^l, M_i^p, B_i^p, dp_i, N_i^E, N_i^d\}$ , де  $C_i^l$  – множина протоколів управління лінією передачі даних;  $M_i^p$  – множина протоколів маршрутизації;  $B_i^p$  – множина протоколів буферизації;  $dp_i$  – множина протоколів диспетчерського управління (управління режимами функціонування мережі);  $N_i^E$  – множина протоколів міжмережної взаємодії, (протоколи взаємодії через шлюзи у зв'язку з несумісністю довільних мереж);  $N_i^d$  – міжмережні протоколи захисту інформації.

Подальша деталізація складових програмного забезпечення можлива тільки у вигляді обширних каталогів.

Користувацьке середовище – сукупність організацій та фізичних осіб, діяльність яких пов'язана з функціонуванням інформаційного середовища.

Аналогічним чином можуть бути структуровані інформаційне, користувацьке та робоче середовище.

Інформаційне середовище – сукупність розміщених на різних носіях інформаційних ресурсів, які обробляються за допомогою відповідних засобів технологічного середовища.

Складові інформаційного середовища:  $B_i$  – бази даних,  $K_i$  – каталоги,  $\Phi_i$  – файли  $i$ -го рівня ієрархії. З наведених міркувань можна зробити висновок, що

спеціалізована структурна модель інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу може бути описана в такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 S &= \{IC, TC, KC, PC\} = \\
 &= \{B, K, \Phi, O, P_r, C, t_r, D, F, S, N, B_T, B_H, T_P, K_{TP}\} = \\
 &= \{B, K, \Phi, O, D_{is}, D_{in}, P_{r\text{int}}, P_i, P_c, M, K_m, K_n, \\
 &\quad md, \text{int}, K_T, d, bnf, op, F^i, F^o, F^p, F^s, F^z, \\
 &\quad S^{on}, S^c, S^d, S^t, C^l, M^p, B^p, dp, N^E, N^d, \\
 &\quad T, A, O_n, C_{on}, \Pi, E, P, B, O_i, T_p, T_{TP}, \Pi_M, K_n\}
 \end{aligned} \quad (10)$$

### Побудова структурної системи підтримки прийняття рішень технологічного процесу у вигляді хмарного сервісу

На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розглянуто структуру інформаційної хмарної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів. Систему умовно можна поділити на наступні етапи:

Перший етап призначений для формалізації вимог до результатів технологічного процесу та визначення вхідних параметрів деталі, яка підлягає обробці. При цьому виділяються вимоги до результату обробки та критерії оптимізації. При недостатній кількості критеріїв або вимог, евристичними правилами першої групи вводяться обмеження а також критерії оптимізації низького пріоритету. З причини можливості існування конфліктів у вимогах, що повинно відображатися в базі знань по відношенням між вимогами, проводиться заміна критеріїв на критерії оптимізації з підвищеним пріоритетом. В результаті не задані критерії та вимоги переводяться в розряд слабких критеріїв оптимізації. Шукані вимоги відповідають за порядок технологічних операцій при виконанні технологічного процесу та параметрів, режимів проведення технологічних операцій. В більшості ситуацій шукані параметри переходять у формування технологічної картки процесу.

Другий етап є структурною оптимізацією, яка має визначити допустимі ланцюги технологічних операцій. Але в складних технологічних процесах з великою кількістю операцій ця задача має комбінаторну складність, що призводить до непомірно великої кількості можливих рішень, які не можна розглянути за розумний інтервал часу. Значно скоротити кількість розглянутих комбінацій можна завдяки використанню евристичних правил, які враховують технічне призначення технологічної операції. Це виражено в формуванні евристичних правил груп 2 та 3. Де друга група визначає призначення операції, а третя – відношення порядку та рівності між операціями. Відношення рівності застосовне у випадках, коли одна технологічна операція може виконати кілька призначень.

В разі об'єднання або зміни технологічних операцій можуть виникати додаткові параметри та критерії обробки, що відображено в евристичних правилах четвертої групи. Тому наступним етапом оптимізації є

використання фільтру доцільності операції та процесу додавання критеріїв вимог, що не завжди можна повністю автоматизувати. Проте цей етап гарантує що додаткові параметри та критерії не будуть втрачені при побудові технологічного процесу.

В результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу за допустимими евристичними правилами, отримуємо множину ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих.

### Приклад застосування запропонованої моделі до технологічного процесу

Системи розробки сучасного транспорту, машино- і приладобудування, а також медичної техніки і товарів народного споживання характеризуються все більш зростаючим рівнем застосування нових конструкційних матеріалів з поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Проблема обмеженості природних запасів більшості хімічних елементів, що становлять основу цих матеріалів, вирішується шляхом застосування складних структур, в яких основа виконана з «звичайних», легко оброблюваних і широко поширених компонентів, а функціональне навантаження виконує покриття з матеріалів із заданим комплексом властивостей. В даний час найбільш ефективними методами формування таких покриттів є процеси газотермічного напилення, серед яких електродугове і плазмового напилення можна вважати найбільш універсальним і легкокерованим. Технологічні переваги електродугового і плазмового напилення, які полягають в можливості отримання з різних, в тому числі і композиційних, матеріалів покриттів різної щільності, товщини і твердості, з необхідними захисними, газодифузійний і іншими властивостями зносостійкого покриття. Наведена розробка має актуальність і перспективу для застосування і впровадження в сучасних технологіях відновлення поверхонь різних конструкцій і деталей машин.

### Постановка задачі оптимізації технологічного процесу електродугової обробки

Технологія електродугового напилення складається з трьох операцій:

$$\begin{cases}
 \bar{Y}_3 = F_3(\bar{X}_3 \cup \bar{Y}_2, \bar{V}_3, \bar{Z}_3, \bar{R}_3), \\
 \bar{Y}_2 = F_2(\bar{X}_2 \cup \bar{Y}_1, \bar{V}_2, \bar{Z}_2, \bar{R}_2), \\
 \bar{Y}_1 = F_1(\bar{X}_1, \bar{V}_1, \bar{Z}_1, \bar{R}_1),
 \end{cases} \quad (11)$$

де:  $F_1$  – математична модель абразивно-струменевої обробки;  $F_2$  – математична модель процесу нанесення підшару;  $F_3$  – математична модель процесу нанесення основного шару.

Завдяки розділенню технологічних операцій спрощується побудова цільової функції. Окремо будуються функції за наступними параметрами:

Відповідність до вимог готового виробу:



$$G(\bar{Y}_3) = \sum_{i=0}^{n-1} \text{ReLu}(\bar{Y}_6 - \bar{Y}_3)_i, \quad (12)$$

де  $\bar{Y}_6$  – вимоги до виробу, як  $n$ -вимірний вектор значень;  $\bar{Y}_3$  – результат обробки;  $i$  – індекс параметру у векторі;  $\text{ReLu}(x)$  – функція відсікання від'ємних значень:

$$\text{ReLu}(x) = \begin{cases} x, & \text{if } (x > 0), \\ 0, & \text{if } (x \leq 0). \end{cases} \quad (13)$$

Мінімальне значення (12) є нуль, коли всі параметри відповідають або перевищують задані вимоги. Так можна формувати вимоги до ріжучих кромок інструментів, наприклад, плугів. В разі потреби штрафування системи, коли результати обробки також і перевищують задані параметри, можна  $\text{ReLu}(x)$  замінити абсолютним значенням або квадратичною функцією. Це відбувається коли деталі взаємодіють тертям. Тоді поверхні повинні мати схожі характеристики матеріалів, тому що тут є важливим зменшення саме відхилення параметрів від заданих величин, і перевищення вимог до твердості так само погано як і недостача. Часто у таких випадках використовують Декартову відстань на багатовимірному просторі, що відкриває можливість використовувати для багатьох випадків аналітичні методи оптимізації методу найменших квадратів. В розглянутому прикладі різального інструменту перевищення вимог по зносостійкості, твердості, зчеплення покриття з основою, зверху не регламентується, тому використання обмеження за мірою (12) є обґрунтованим.

Для врахування часових  $T$  та матеріальних  $M$  витрат, відповідно використовують залежності (14):

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^3 T_k (\bar{X}_k, \bar{X}_k \cup \bar{Y}_{k-1}, \bar{V}_k), \\ M &= \sum_{k=1}^3 M_k (T_k, \bar{X}_k \cup \bar{Y}_{k-1}, \bar{V}_k), \\ \bar{Y}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

До системи додано  $\bar{Y}_0 = 0$ , бо перша операція не вимагає результатів попередньої, тому до керованих величин першої операції додається пуста множина.

До матеріальних витрат входять оплата працівникам, оренда приміщення, та інші параметри, які залежать від часу проведення технологічної операції та види й об'єми матеріалів і енергоносіїв в грошовому еквіваленті. Повна функція витрат  $G$ , результат якої повинен бути дійсним числом, є лінійною комбінацією (12) та (14):

$$G = c_0 G(\bar{Y}_3) + c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min, \quad (15)$$

де  $c_0, c_1, c_2$  – додатні дійсні коефіцієнти, які відбивають пріоритетність досягнення тих чи інших показників.

У випадках необхідності дотримання технічних вимог до виробу, обмеженні максимального часу виробництва, (15) може приймати інші форми, наприклад:

$$\begin{cases} G(\bar{Y}_3) = 0, \\ c_1 \sum_{k=1}^3 M_k + c_2 \sum_{k=1}^3 T_k \rightarrow \min. \end{cases} \quad (16)$$

Це свідчить про поділ вагового виразу на вимоги та критерій оптимальності, де вимог може бути кілька, а критерій оптимальності повинен бути єдиним. В разі відсутності критичних вимог, критерію оптимальності (15) достатньо для оптимізації ланцюга технологічних операцій.

В результаті аналізування руху інформації при проведенні оптимізації технологічного процесу на основі ланцюга технологічних операцій виявлено потребу в забезпеченні в інформаційній системі можливість визначення множини технологічних операцій  $F_k$ ; для кожної з операцій забезпечити перелік керованих  $\bar{X}_k$  та некерованих  $\bar{V}_k$  параметрів з їх обмеженнями; можливість завдання методів розрахунку близькості виконання поставлених вимог  $G(\bar{Y}_k)$ ; можливість забезпечити завдання методів розрахунку часових та матеріальних витрат по кожній технологічній операції за формулами (15) або (16) можливість забезпечити реалізації методів моделювання технологічних операцій (11) таблично, аналітично або комп'ютерним симулюванням.

### Формалізація технологічного процесу електродугової обробки

Технологічний процес електродугового напилення в процесі відновлення або зміцнення поверхонь деталей, складається з поетапної обробки:

- 1) струменево-абразивної обробки;
- 2) при потребі нанесення підшару;
- 3) основний процес нанесення покриття;
- 4) доведення утвореної поверхні металорізанням або шліфуванням.

Перший етап призначений для збільшення шорсткості поверхні деталі, яка оброблятиметься. Цей процес збільшить площу зчеплення деталі та покриття, що покращить міцність утримання утвореної поверхні. Підшар є максимально тонкий шар матеріалу який має функцію усунення несумісності основного та нанесеного матеріалу з хімічних причин або не злипання матеріалів. Іноді для забезпечення сильного зчеплення використовують молібденові підшари.

Основний процес нанесення металу проводиться розплавленням його електричною дугою і перенесенням за допомогою струменя стисненого повітря на поверхню деталі. Для запобігання утворення окислів та регулювання вмісту вуглецю, в повітря можна додавати пропан, завдяки горіння якого зменшується вміст кисню в струмені, а швидкість витоку газу в струмені може сягати кілька швидкостей звуку.

Доведення поверхні до стандартів деталі, проводять на металорізальних верстатах та шліфуванням.

Устаткування в процесі напилення можна побачити на рис. 1. В результаті огляду обробки поверхонь деталей електродуговим напиленням отримано наступну структурну схему ланцюга технологічних операцій (рис. 2). Відповідно початковим умовам та вимогам до результату, перші дві технологічні операції можуть і не виконуватися, тому комбінаторна складність технологічного процесу є чотири можливих варіанти. Для такої кількості варіантів, є доцільним

проведення оптимізації для чотирьох ланцюгів технологічних операцій, з обранням результату, що матиме кращий результат згідно вагової функції.

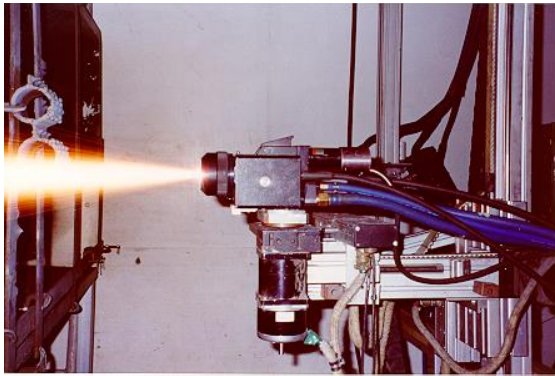


Рис. 1. Устаткування електродугового напилення в роботі (Fig. 1. Electric arc spraying equipment in operation)

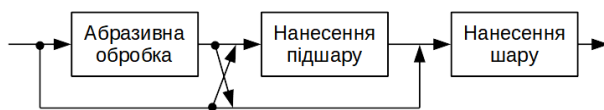


Рис. 2. Структура операцій електродугової обробки поверхонь (Fig. 2. The structure of operations of electric arc surface treatment)

Методом повнофакторного планування та проведення експерименту, визначено параметри, які з достатньою точністю дають керування результатами обробки. Також, для визначення міцності зчеплення приведені доступні дані. Приклад експериментальної залежності зміни міцності зчеплення сплаву з нанесеним порошком наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив способу підготовки поверхні сплаву ВТЗ-1 на міцність зчеплення з покриттям порошком ВК15 [4]

Спосіб підготовки поверхні	Шорсткість, $R_z$ , мкм	Міцність зчеплення, МН/м <sup>2</sup>
Точіння	10	50
	14	65
	16	120
Легка піскоструменева обробка корундом зернистістю 450-980 мкм при тиску повітря 0.45 МПа	20	56
	22	101
	24	115
	27	140
	36	90
	38	65
Дробоструменева обробка сталевими кульками 0.5..1 мм при тиску повітря 0.45 МПа протягом 150 сек	39	35
	2..3	43..72

В результаті, для першої операції дробоструменевої обробки маємо основні параметри:  $t_1$  – час обробки;  $p_1$  – тиск повітря в системі обробки;  $P_1$  – енергоспоживання устаткування для дробоструменевої обробки;  $r_1$  – час амортизації устаткування;  $m_1$  – вартість устаткування;  $m_{P1}$  – вартість енергетичних ресурсів та матеріалів, які використовуються за одиницю часу в обраному режимі роботи;  $\sigma$  – твердість матеріалу,

який обробляється. Однак, не всі вказані величини впливають на силу зчеплення покриття:

$$Y_1 = H(<t_1, p_1, \sigma, \{\text{хімічний склад основи}\}, \{\text{вид покриття}\}, \{\text{технологія нанесення покриття}\}>),$$

де  $t_1 = T_1(<p, \sigma>)$  – тут час обробки залежить від тиску повітря в системі, тобто від сили взаємодії абразиву з матеріалом та від твердості оброблювального матеріалу. Абразив в цьому процесі вважається незмінним і входить до вартості зносостійкості устаткування.  $M_1 = M_1(<t_1, r_1, P_1, m_1, m_{P1}, p_1>)$  – матеріальні витрати в основному залежать від часу роботи устаткування та його зносостійкості. Ці параметри можна виразити з режиму навантаження та часу роботи. Також залежить від режиму роботи і потужність енергоспоживання. Ці величини можна визначити з робочого тиску повітря в системі та часу роботи системи, який потрібний до досягнення бажаного результату. Матеріальні витрати зводять до скалярної величини через їхню вартість, або по кількості або по часу за діяння у процес.

У випадках нехтування вартістю процесу на користь зменшення часу виробництва, повністю функцією вартості знехтувати не можна, бо устаткування при перенавантаженні може вийти з ладу, що зупинить виробничий процес. Тому розрахунок розпадається на оптимізацію по мінімізації часу з обмеженням на гарантованість залишення устаткування в стані обробити задану кількість деталей.

Залежність вказаних величин можна побачити в табл. 2., в якій наведено назви величин, які враховуються в процесі оптимізації технологічної операції дробоструменевої обробки поверхні для підвищення адгезії  $A$  до заданого значення при мінімальних витратах ресурсів. Деякі величини з таблиці мають взаємну залежність, що свідчить про те, що система утворює систему, можливо нелінійних, рівнянь з кількома невідомими. В загальному випадку таку систему розв'язувати аналітично є не доцільним з причини відсутності способів аналітичного розв'язання або значної складності цих методів розв'язання.

Натомість, для вираження групи шуканих параметрів через відомі параметри з виконанням накладених на них обмежень та досягнення мінімального/максимального значення вагової функції, яка виражає обсяг витрат, використовують чисельні методи та аналітичні регресійні поліноми по експериментальним даним, які або дозволяють отримати аналітичний розв'язок або прямо виражають параметри процесу через задані результати та обмеження.

Наступні етапи обробки проводять на однаковому устаткуванні, лише процеси відмінні в матеріалах, які утворюють шар та підшар, а також відрізняються товщина шару та прошарку.

Прошарок використовується в технології газопламеневої напилення, коли матеріал поверхневого шару має хімічну несумісність з основним матеріалом, або основний шар не може утворити достатню адгезію до основного матеріалу. Тому матеріал для утворення прошарку має бути хімічно нейтральним до матеріалу деталі та основного шару та мати достатню адгезію до матеріалів основи та покриття. В особливо

важких випадках є виправданим використання прошарку з молібдену, який має високу адгезію з більшістю матеріалів. Важливим є те, що для адгезійного прошарку достатньо нанесення матеріалу шаром в

декілька молекул, тому використання молібдену не призводить до значного зростання вартості процесу.

В табл. 3 наведено результати експериментів по нанесенню покриттів газопламеневим методом.

Таблиця 2 – Величини, які враховуватимуться в дробоструменевому етапі відновлення поверхонь деталей

№	Назва	Позначення	Залежність
1	Час обробки	$t_1$	Шукане/задане, $p_1, \sigma$ , {вид покриття}, {технологія нанесення покриття}
2	Тиск повітря в системі обробки	$p_1$	– « –
3	Енергоспоживання устаткування для дробоструменевої обробки	$P_1$	Шукане, $p_1$
4	Час амортизації устаткування	$r_1$	Задане, $p_1$
5	Вартість устаткування	$m_1$	Задане
6	Вартість енергетичних ресурсів та матеріалів	$mp_1$	Задане
7	Твердість матеріалу, який обробляється	$\sigma$	Задане
8	Хімічний склад основи	{хімічний склад основи}	Шукане/задане, з переліку доступних {вид покриття}, {технологія нанесення покриття}
9	Вид покриття	{вид покриття}	Шукане/задане, з переліку доступних {хімічний склад основи}, {технологія нанесення покриття}
10	Технологія нанесення покриття	{технологія нанесення покриття}	Шукане/задане, з переліку доступних {хімічний склад основи}, {вид покриття}
11	Міцність зчеплення, Адгезія	$A_1$	$t_1, p_1$ , {хімічний склад основи}, {технологія нанесення покриття}, {вид покриття}

Таблиця 3 – Величини, які враховуватимуться в дробоструменевому етапі відновлення поверхонь деталей

№	Назва	Позначення	Залежність
1	Напруга дуги	$U$	Шукане, 28..34 В
2	Дистанція напилення	$L$	Шукане, 80..200 мм
3	Діаметр дроту	$d$	Шукане, 1,2..2,2 мм
4	Товщина прошарку/покриття	$h$	Шукане, 0,5..3,0 мм – для покриття, <0,5 – для прошарку
5	Тиск в камері	$p$	Шукане, 2..10 МПа
6	Швидкість ковзання	$v$	Шукане, 2,0..2,75 м/с
7	Пористість	$\rho$	Шукане/задане, <10%
8	Міцність зчеплення	$A_1$	Шукане/задане, 30..70 МПа
9	Твердість	$\sigma$	Шукане/задане, 6900..73000 МПа
10	Зносостійкість	$J$	Шукане/задане, 11..15 мкм/км ( $10^{-12}$ )
11	Хімічний склад основи	{хімічний склад основи}	Задане, з переліку доступних {вид покриття}
12	Вид покриття	{вид покриття}	Шукане/задане, з переліку {хімічний склад основи}

Нажаль, моделювання фізико-хімічних процесів при газопламеневому нанесенні покриттів є складним, в результаті чого відокремити незалежні параметри майже неможливо. Тому для побудови математичних залежностей для газопламеневого напилення було використано метод регресійного аналізу на отриманих експериментально даних (табл. 4).

Відповідно до обраного методу реалізації математичної моделі процесу, користувач інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу повинен мати можливість використовувати аналітичні моделі, табличне завдання залежності між величинами, або аналітичні або алгоритмічні методи числових засобів моделювання процесу, який оптимізується.

В результаті аналізу технологічних операцій підготовки поверхні деталей методом дробоструменевої обробки, з метою підвищення адгезії покриття, та нанесення газопламеневим методом адгезійного шару та основного покриття, **виділено величини**, які можуть виступати в якості характеристик результатів технологічної операції та в якості керованих параметрів технологічних операцій.

**Зазначено необхідність** підтримки в інформаційній системі визначення залежності між величинами аналітичними методами, таблично, алгоритмічно та за допомогою імітаційних моделей. Розглянуті інформаційні одиниці є функціонально різними, деякі величини мають здатність змінювати функціональну здатність переходом від шуканих величин до обмежень на технологічну операцію, що накладає на систему керування змінними додаткові функціональні можливості та універсальність до трансформації моделювання технологічного процесу.

#### Формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення

Для проектування технологічного процесу потрібно визначити: геометричні розміри деталі, поверхню якої потрібно обробити або відновити; для відновлення валів критичними є довжина оброблювальної частини деталі  $L_0$ , діаметр  $D_0$  утворення мінімального циліндру покриття деталі, цей параметр має вплив на мінімальну можливу дистанцію напилення  $L$ .

Таблиця 4 – Експеримент по виявленню залежності між керованими та шуканими величинами процесу газопламеного напилення

Фактори	Напруга дуги	Дистанція напилення	Діаметр дуги	Товщина покриття	Навантаження	Швидкість ковзання	Міцність зчеплення	Зносостійкість
№ експ.	$U, \text{В}$	$L, \text{мм}$	$d, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	$P, \text{МПа}$	$V_{\text{ск}}, \text{м/с}$	$A, \text{МПа}$	$J_h, \text{мкм/км}$ ( $10^{-9}$ )
1	30	140	1,6	1,5	6	2,3	115	0,014
2	32	100	1,4	2,5	4	2,6	90	0,013
3	29	180	2	1	8	2,15	120	0,013
4	34	200	1,2	2	8	2	95	0,014
5	30	120	1,8	0,5	2	2,45	100	0,012
6	28	160	1,6	1,5	10	2,75	80	0,015
7	31	80	2,2	3	4	2,3	110	0,013
8	29	160	1,2	3	2	2	80	0,011
9	32	100	1,8	1,5	8	2,45	115	0,015
10	31	200	1,4	1	6	2,6	70	0,014
11	28	140	2	2,5	10	2,15	90	0,015
12	32	120	1,4	1	6	2,15	105	0,013
13	29	180	2	2,5	2	2,6	90	0,012
14	30	80	1,6	2	10	2,75	120	0,015
15	34	140	2,2	0,5	4	2,3	60	0,013
16	29	120	1,2	2	6	2,15	75	0,012

Таблиця 5 – Перелік вхідних параметрів та вимог до результатів технологічного процесу

№	Назва	Позначення	Обов'язковість
1	Гвєрдїсть матерїалу основи для обробки	$\sigma_{\text{ex}}$	«Так»
2	Матерїал основи	$M_{\text{ex}}$	«Так»
3	Матерїал покриття	$M_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданї властивостї поверхнї, інакше «Так»
4	Мїцнїсть зчеплення покриття до основи, адгезїя	$A_l$	«Нї»
5	Геометричнї розмїри для нанесення покриття	$L_0, D_0, \dots$	«Так»
6	Геометричнї розмїри пїсля нанесення покриття	$L_{\text{вих}}, D_{\text{вих}}, \dots$	«Нї», якщо задана товщина слою нанесення, інакше «Так»
7	Товщина покриття	$h_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданї вихїднї розмїри, інакше «Так»
8	Пористїсть покриття	$\rho_{\text{вих}}$	«Нї»
9	Гвєрдїсть покриття	$\sigma_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданїй матерїал поверхнї, інакше «Так»
10	Зносостїкїсть покриття	$J_{\text{вих}}$	«Нї», якщо заданїй матерїал поверхнї, інакше «Так»
11	Товщина пїдшарку	$h_{\text{пїд}}$	«Нї»

*Правило 1.5.* Якщо вимога суперечить іншій вимозі, провести вибір прїоритету, і менш прїоритетну вимогу перевести в критерїй оптимїзацї з високим прїоритетом.

*Правило 1.6.* Якщо вимога або критерїй не заданї, накласти на вимогу критерїй оптимїзацї низького прїоритету на мїнїмїзацїю витрат ресурсїв.

Наступнї евристично визначенї дїї пов'язанї з обранням технологїчних дїй:

*Правило 2.1:* Якщо за геометричними параметрами деталї не можна встановити на обладнання автоматичної обробки, потрїбно перейти до розрахункїв продуктивностї та точностї ручної працї.

*Правило 2.2:* Якщо матерїали деталї та покриття є такими що важко поєднувати з точки зору хїмїчної

Також з означених параметрїв робиться висновок про можливїсть встановлення валу на верстат автоматичної подачї. Деталї, якї не є валами, повиннї оброблятися вручну.

Важливу роль має матерїал з якого зроблено деталї, поверхня якої пїддається обробцї. Наприклад, за «Valid and invalid contacts of metals in accordance with GOST 9.005-72» визначаються матерїали, якї не допустимї в спїльному використаннї з точки зору корозїйної стїкостї. В разї присутностї у вимогах до результату обробки деталї матерїалу покриття, який є несумїсним з матерїалом основи, технїчний процес повинен обов'язково доповнюватися нанесенням прошарку з металу, який є сумїсним з основою та покриттям одночасно.

Згїдно зазначеним особливостям планування технологїчного процесу напилення потрїбно визначити вхїднї данї (табл. 5, собївартїсть процесу для цього прикладу не враховано). З зазначених вимог що до визначення вимог технологїчного процесу виникають наступна група евристичних правил:

*Правило 1.1:* Якщо вимога обов'язкова, вимагати заповнення вїдповїдних полїв.

*Правило 1.2:* Вимога перестає бути обов'язковою, якщо визначено параметр(и), за яким(и) можна провести процес визначення цїєї вимоги.

*Правило 1.3:* Накладання умов оптимїзацї можливе лише для необов'язкових параметрїв.

*Правило 1.4:* Необов'язковї параметри можна залишити не заданими, але автоматично на всї параметри повиннї накладатися обмеження, якї вїдповїдають фїзичним властивостям процесу.

сумїсностї, закрїпити операцїю нанесення пїдшарку як обов'язкову.

*Правило 2.3:* Якщо матерїал покриття має недостатню адгезїю до матерїалу деталї, закрїпити операцїю нанесення пїдшарку як обов'язкову.

*Правило 2.4:* Якщо товщина  $h_{\text{вих}}$  нанесення матерїалу значна, запропонувати можливїсть нанесення пїдшарку з бїльш дешевого матерїалу.

Наступнї правила призначенї для визначення функцїональних призначень технологїчних операцїй, що може вплинути на визначення дїй в наступнїй групї операцїй:

*Правило 3.1:* Якщо матерїали деталї та покриття по хїмїчному складу та механїчним властивостям частково не сумїснї, то позначити операцїю нанесення

підшарку як обов'язкову з додаванням атрибуту {«сумісність»}. Можливе використання кількох призначень. Результат може бути виведений логічно при врахуванні результатів застосування правил 2 групи.

**Правило 3.2:** Якщо відновлювальна поверхня має корозійні забруднення, визначити дробострумінну обробку як обов'язкову операцію з додаванням атрибуту {«очищення»}.

**Правило 3.3:** Якщо адгезія між базовим матеріалом та нанесенням не достатня, та збільшення контактної площі шляхом підвищення шорхості достатнє для досягнення заданої величини, то додати операцію дробострумінної обробки як обов'язкову з атрибутом {«адгезія»}.

**Правило 3.4:** Якщо адгезія між базовим матеріалом та нанесенням не достатня, позначити технологічну операцію нанесення з додаванням атрибуту {«адгезія»}.

**Правило 3.5:** Якщо товщина нанесення покриття  $h_{вих}$  є значною (залежить від матеріалу покриття), то додати операцію нанесення підшарку з додаванням атрибуту {«заповнення»}.

**Правило 3.5:** Якщо операція нанесення покриття призначена для поверхневого шару, додати їй атрибут {«поверхня»}.

Четверта група евристичних правил призначена для уточнення параметрів та вимог до технологічних операцій згідно виставлених атрибутів:

**Правило 4.1:** Якщо передбачено нанесення підшарку з присутнім функціональним призначенням {«заповнення»}, провести процедуру визначення  $h_{nid}$  – товщини підшарку.

**Правило 4.2:** Якщо дробострумінні операції задані атрибутами {«адгезія»} та {«очищення»}, внести корекцію часу обробки та об'єднати операції.

**Правило 4.3:** Якщо операції нанесення підшарку мають атрибути {«адгезія»} та {«заповнення»} і при цьому використовують однаковий матеріал, то об'єднати операції та їх атрибути.

**Правило 4.4:** Якщо операції нанесення підшарку мають атрибути {«заповнення»} та {«поверхня»} і при цьому використовують однаковий матеріал, то об'єднати операції та їх атрибути.

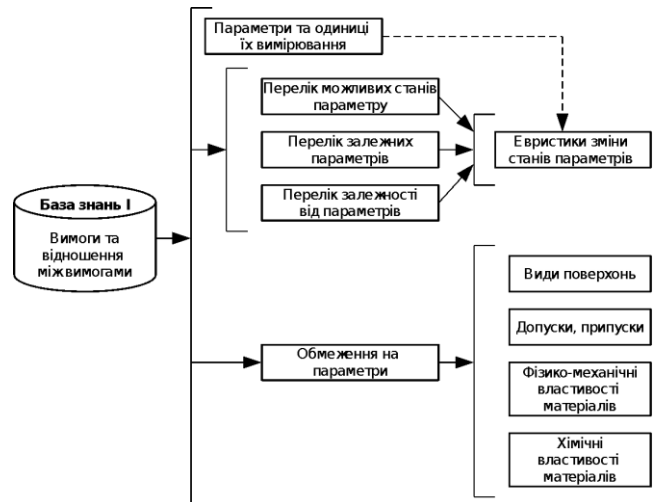
**Правило 4.5:** Якщо операція немає атрибуту, то вилучити її з ланцюга операцій.

### Розробка структури бази знань технологічного процесу

З метою забезпечення інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу автоматизованого планування технологічного процесу є необхідним наповнення баз даних та баз знань. База знань «Вимоги та відношення між вимогами» регламентується таблицями 2 та 3. Відповідно до цих таблиць складена наступна структура бази знань (рис. 3).

Пункт «Параметри та одиниці вимірювання» заповнений за даними наведеними в табл. 3 та 4. Також ці таблиці містять можливі стани. Деякі параметри можуть мати один з кількох станів, якщо мета оптимізації обробки відрізняється. Тому для забезпечення розв'язності поставленої задачі оптимізації, необхідно мати набір необхідних параметрів, або їх допустимі діапазони;

за виконання правильності постанови задачі побудови технологічного процесу відповідає блок «Евристики зміни станів параметрів». Евристики відповідають першій групі переліку евристичних знань в п. 4.



**Рис. 3.** База знань для визначення вхідних даних для забезпечення побудови процесу відновлення поверхні деталі методом електродугового напилення (Fig. 3. Knowledge base for determining the input data to ensure the construction of the process of restoring the surface of the part by the method of electric arc spraying)

«Види поверхонь», «Допуски, припуски» заповнюються на основі табличних даних на наведені в ДСТУ 2391-94, ГОСТ 26645-85, ГОСТ 7505-89, ГОСТ 7062-74, ГОСТ 7829-74. Так само загальна величина допусків повинна відповідати вимогам до якості деталі.

Фізико-механічні властивості матеріалів визначаються за ДСТУ 4219-2003, ДСТУ 2494-94. У випадках відсутності відомостей про матеріал деталі, використовують значення які отримані за методами визначеними ДСТУ EN 10002-1:2006, ДСТУ EN 10002-5:2006, ГОСТ 1497-84 – випробування металів на розтяг; та інші. Допускається випробування матеріалів на міцність за допомогою каліброваних терпугів або портативними твердомірами.

Сумісність використання контактуючих металів регламентується за ГОСТ 9.005-72 ЕСЗКС, та можливі матеріали покриттів регламентовано ГОСТ 10052-75.

Наступна, друга база знань відповідає за набір евристик, які визначають доцільність технологічних операцій і має наступну структуру (рис. 4):

Блок з даними для повторного використання на схемі рис. 4 показано як базу даних четвертої групи – використання другої бази знань повинне забезпечити систему прив'язки технологічних операцій за їх призначенням в технологічному процесі відновлення поверхонь. Регламентуються ці правила другою групою евристичних правил. На цьому етапі технологічні операції можуть додаватися до ланцюга процесів обробки, набувати атрибутів призначення та може відбуватися закріплення операції як обов'язкової, що запобігає її виключенню на наступних етапах проектування та оптимізації.



Рис. 4. База знань для евристик відбору технологічних операцій за призначенням (Fig. 4. Knowledge base for heuristics of selection of technological operations by purpose)

Наступна третя база знань призначена для вирішення проблеми зв'язку послідовних технологічних операцій за критеріями та параметрами. Є природнім те, що результат попередньої операції впливатиме на результат наступної, тому для технологічного процесу між технологічними операціями є невизначеність в множині параметрів, залежність наступної операції від значення цих параметрів та варіативність отримання характеристик після проміжної технологічної операції. База знань, структуру якої представлено на рис. 5, регламентує зв'язок вхідних та вихідних параметрів технологічного процесу. Також тут міститься інформація про наявні математичні моделі процесів, математичних залежностей між вхідними та вихідними параметрами з обмеженнями на їх значення. Ці знання дозволяють організувати математичну модель оптимізації процесу по заданим критеріям. Однак критерії проміжних операцій впливають на загальні величини, такі як енерговитрати, час роботи, та інші.

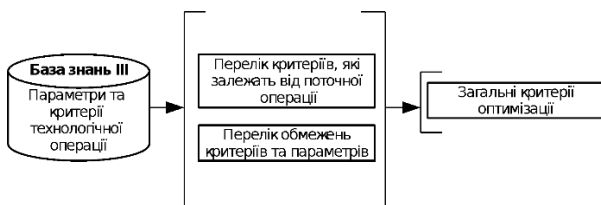


Рис. 5. База знань параметрів та критеріїв технологічної операції (Fig. 5. Knowledge base of parameters and criteria of technological operation)

Остання база знань, яка відноситься до конкретної технологічної операції, позначена як п'ята група, містить математичні моделі, які можуть бути використані для знаходження режимів обробки при яких витрати за оптимізаційними параметрами є мінімальними. З причин варіативної свободи у виборі вхідних параметрів технологічної операції за рахунок варіацій попередніх операцій, інформаційна система має можливість будувати множину допустимих вихідних параметрів, тим самим множина кількості варіантів виконання наступних технологічних операцій, а значить і вільних змінних в процесі оптимізації в цілому, значно збільшується. Тому проведення оптимізації в цілому є задачею на значно більшому просторі ступенів вільності.

Остання, шоста база знань відповідає за збереження четвертої групи евристичних правил. Ці правила дозволяють виключити з процесу не обов'язкові технологічні операції або об'єднати різні за призначенням, але однакові за параметрами технологічні операції в одну. Завдяки використанню структурної оптимізації, співвідношення операцій по призначенню, значно знижується комбінаторна складова технологічного процесу.

### Діаграма використання інформаційної системи забезпечення побудови та оптимізації технологічного процесу електродугового наплення

Розглянуті моделі, структури та бази знань інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу технологічного процесу електродугового наплення повинні поєднуватися в єдину систему, структура якої повинна відповідати сценарію використання системи, її задачам і можливостям. Тобто, сценарій використання повинен відбивати процеси проектування технологічного процесу і відповідати логіці її використання користувачами. Враховувати можливість обслуговування кількох користувачів. Задачу представлення моделі використання системи можна виконати використавши діаграму універсальної мови моделювання UML. Діаграма (рис. 6) містить умовні інтерфейси до інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу забезпечення проектування технологічного процесу з оптимізацією за вказаними параметрами. Із системою повинні взаємодіяти умовні «замовник» та «виконавець».

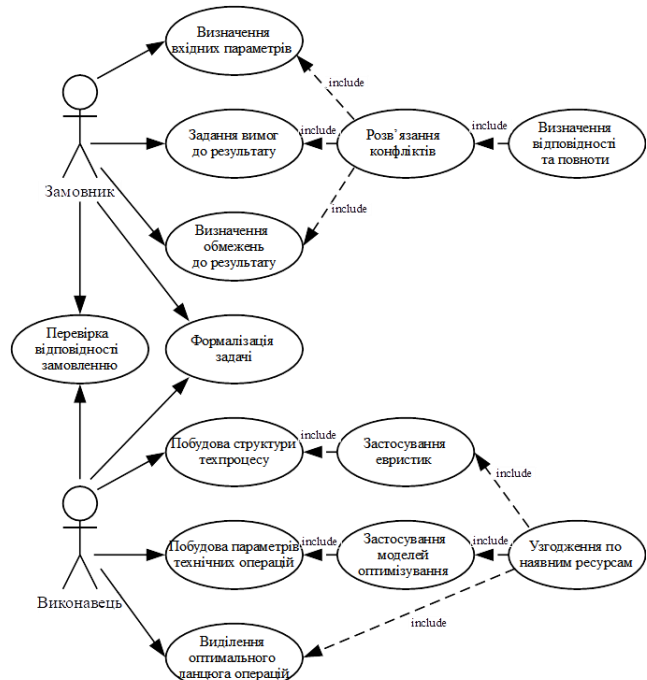


Рис. 6. USE CASE DIAGRAM (прецедентів), структура та взаємодія інтерфейсів інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу проектування та оптимізації технологічного процесу мовою UML (Fig. 6. USE CASE DIAGRAM (precedents), structure and interaction of interfaces of information system of design and optimization of technological process in UML language)

Первинною задачею системи є узгодження взаємодії замовника та виконавця для формалізації задачі. Таке узгодження є необхідним для формалізації задачі створення та оптимізації ланцюга технологічних операцій. До підготовчого етапу відносяться взаємодії із «замовником», при цьому є обов'язковою зворотній зв'язок з «виконавцем», який посередньо інтерфейсів перевірки відповідності та формалізації задачі забезпечує зворотній зв'язок ітераційного уточнення остаточної задачі. Ітерації уточнення проводяться до отримання формалізованої задачі, яка не містить невизначеностей, конфліктів і при цьому повинна гарантуватися наявність критеріїв оптимізації та обмежені на задані та шукані величини. Відповідно парадигмі проектування UML, «замовник» та «виконавець» є ролі які можуть бути представлені однією або кількома особами або колективами. Невизначеність розташування акторів та інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу в загальному випадку виправдовує перенесення інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу у хмарні технології, коли взаємодія системи та акторів може відбуватися роздільно як і по розташуванню так і по часу доступу.

### Висновки

Дослідження, проведені в даній роботі, дозволили провести розробку моделі системи підтримки технологічних процесів з використанням хмарних інформаційних технологій. Отримані такі результати.

1. Було проаналізовано труднощі автоматизації проектування технологічних процесів, пов'язані головним чином з тим, що завдання проектування технологічних процесів не мають в даний час формальних методів вирішення. Тому для здійснення технологічного проектування було проведено розробку формалізації технології (або її частини), тобто провести заміну (перетворення) змістовних пропозицій математичним апаратом. В результаті даною формалізації було запропоновано схему руху інформації в процесі оптимізації технологічного процесу.

2. Було розроблено модель реалізації структури технологічного процесу, для якої було визначено основні входні параметри: перелік параметрів, які впливають на процес; перелік параметрів, які є результатом процесу; перелік керованих параметрів; перелік некерованих параметрів; перелік невідомих параметрів; деталізована структура технологічного процесу з розділенням параметрів та результатів. Також була запропонована структура експертної системи для оптимізації технологічних процесів, проаналізовані методи представлення знань та відповідно розроблено схему потоків інформації під час реалізації даної експертної системи.

3. На основі розглянутих та розроблених методів та механізмів, які використовують для розробки технологічних процесів розроблено структуру інформаційної хмарної системи підтримки прийняття рішень для автоматизації створення оптимізованих технологічних процесів.

4. За допомогою використання розроблених методів та моделей, в результаті проведення процесу оптимізації технологічного процесу за допустимими евристичними правилами, вдається отримати множину ланцюгів окремо оптимізованих технологічних процесів, з якої проводиться багатокритеріальний відбір, що відповідає поставленим вимогам оптимізації. Користувач системи може отримувати у відповідь як і одну картку технологічного процесу, так і декілька найкращих.

5. Розроблені підходи оптимізації технологічних процесів були застосовані до вирішення задачі оптимізації технологічного процесу електродугової обробки. Спочатку було проведено формалізацію технологічного процесу електродугової обробки. Після цього, було проведено формування евристичних правил та бази знань структури технологічного процесу електродугового напилення та відповідно розроблено структури бази знань даного технологічного процесу та діаграма використання розробленої інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.А. Смирнов, Т.В. Смирнова, А.Н. Дреев, А.В. Дудан Оптимизация технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей с заданными характеристиками в виде облачного сервиса / Вестник Полоцкого государственного университета. №3 (2020). – с. 50-61.
2. Попов М.Е., Абухарб М. Система поддержка принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР. Вестник Донского государственного технического университета. 2011;11(3):333-342.
3. Скрипка, К.И. Экспертная система автоматизированного выбора способов восстановления сработанных деталей / К.И. Скрипка, М.А. Зенкин / Вестн. ЖДТУ. Технические науки. – 2004. – № 1 (28). – С. 66–68.
4. Смирнова, Т.В. Формалізація та реалізація структури технологічного процесу електродугового напилення для оптимізаційної експертної системи / Т.В. Смирнова // Технічні науки та технології. – 2020. – № 1 (19). – С. 104-113.
5. Смирнова Т.В. Формування евристичних правил, бази знань та формалізація структури й правил технологічного процесу для оптимізаційної хмарної інформаційної системи у вигляді хмарного сервісу / Т. Smirnova // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2020. – Т. 2 (60). – С. 101-104. –
6. Смирнова, Т.В., Минайленко, Р. М., Доренський, О. П., Сисоєнко, С. В., Смирнов, С. А. (2021). Хмарна автоматизована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів. Вісник Черкаського державного технологічного університету, (4), 84–92.
7. Попов М.Е. Основы САПР технологических операций упрочняющей обработки: учеб. пособие / М.Е. Попов; РИСХМ. – Ростов н/Д, 1987. – 91 с.
8. Попов М.Е. Формализованное описание структуры базы данных методов упрочняющей обработки в интегрированных САПР / М.Е. Попов // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. – 2000. – (Проблемы производства машин). – С. 88-91
9. Горелова Г.В. Метод оптимума номинала и его применение / Г.В. Горелова, В.В. Здор, Д.В. Свечарник. – М.: Энергия, 1970. – 200 с.

10. Попов М.Е. Разработка и постановка продукции на производство на основе структурирования функции качества / М.Е. Попов, А.М. Попов // Вестник машиностроения. – 2000. – №7. – С. 52-58.
11. Анфёров М.А. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении / М.А. Анфёров, С.Г. Селиванов. – Уфа: Гилем, 1996. – 185 с.
12. САПР. Типовые математические модели объектов проектирования в машиностроении: метод. указания. РД 50-464-84. – М.: Стандарты, 1985. – 200 с.
13. Попов М.Е. Интеграция конструкторского и технологического проектирования на основе концепции Concurrent Engineering / М.Е. Попов, А.М. Попов // Вестник машиностроения. – 1998. – №4. – С. 41-45.
14. Вереск, О.М. Технологии поддержки принятия решений / О.М. Вереск. – Львов: Изд-во Львов. политехники, 2013.
15. Хох, В.Д. Исследование методов построения экспертных систем / В.Д. Хох, Е.В. Мелешко, М.С. Якименко // Системы управления, навигации и связи. – 2016. – Вып. 4(40). – С. 48–52.
16. Лимаренко, В.В. Информационная система поддержки решений для автоматизации создания технологических процессов механообработки деталей высокоточного оборудования: дис. канд. ... техн. наук / В.В. Лимаренко. – Харьков, 2019.

## REFERENCES

1. A.A. Smirnov, T.V. Smirnova, A.N. Dreev, A.V. Dudan Optimizaciya tekhnologicheskogo processa vosstanovleniya i uprochneniya poverkhnostej s zadannymi kharakteristikami v vide oblachnogo servisa / Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. №3 (2020). – s. 50-61.
2. Popov M.E., Abukharb M. Sistema podderzhka prinyatiya resheniya pri vybore metoda uprochnyayushchej obrabotki detalej mashin v integrirovannykh SAPR. Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011;11(3):333-342.
3. Skripka, K.I. Ekhspertnaya sistema avtomatizirovannogo vybora sposobov vosstanovleniya srobotannykh detalej / K.I. Skripka, M.A. Zenkin / Vestn. ZHDTU. Tekhnicheskie nauki. – 2004. – № 1 (28). – S. 66–68.
4. Smirnova, T.V. Formalizaciya ta realizaciya strukturi tekhnologichnogo procesu elektrodugovogo napilennya dlya optimizacijnoi ekspertnoi sistemi / T.V. Smirnova // Tekhnichni nauki ta tekhnologii. – 2020. – № 1 (19). – S. 104-113.
5. Smirnova T.V. Formuvannya evristichnikh pravil, bazi znan' ta formalizaciya strukturi j pravil tekhnologichnogo procesu dlya optimizacijnoi khmarnoi informacijnoi sistemi / T. Smirnova // Sistemi upravlinnya, navigacii ta zv'yazku. Zbirknik naukovikh prac'. – Poltava: PNTU, 2020. – T. 2 (60). – S. 101-104. –
6. Smirnova, T.V., Minajlenko, R. M., Dorens'kij, O. P., Sisoenko, S. V., Smirnov, S. A. (2021). Khmarna avtomatizovana sistema intelektual'noi pidtrimki priynyattya rishen' dlya tekhnologichnikh procesiv. Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu, (4), 84–92.
7. Popov M.E. Osnovy SAPR tekhnologicheskikh operacij uprochnyayushchej obrabotki: ucheb. posobie / M.E. Popov; RISKHM. – Rostov n/D, 1987. – 91 s.
8. Popov M.E. Formalizovannoe opisanie struktury bazy dannykh metodov uprochnyayushchej obrabotki v integrirovannykh SAPR / M.E. Popov // Vestn. Donsk. gos. tekhn. un-ta. – 2000. – (Problemy proizvodst-va mashin). – S. 88-91
9. Gorelova G.V. Metod optimuma nominala i ego primenenie / G.V. Gorelova, V.V. Zdor, D.V. Svecharnik. – М.: Ehnergiya, 1970. – 200 s.
10. Popov M.E. Razrabotka i postanovka produkcii na proizvodstvo na osnove strukturirovaniya funkcii kachestva / M.E. Popov, A.M. Popov // Vestnik mashinostroeniya. – 2000. – №7. – S. 52-58.
11. Anfyorov M.A. Strukturnaya optimizaciya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii / M.A. Anfyorov, S.G. Selivanov. – Ufa: Gilem, 1996. – 185 s.
12. SAPR. Tipovye matematicheskie modeli ob'ektov proektirovaniya v mashinostroenii: metod. uka-zaniya. RD 50-464-84. – М.: Standarty, 1985. – 200 s.
13. Popov M.E. Integraciya konstruktorskogo i tekhnologicheskogo proektirovaniya na osnove koncepcii Concurrent Engineering / M.E. Popov, A.M. Popov // Vestnik mashinostroeniya. – 1998. – №4. – S. 41-45.
14. Veresk, O.M. Tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenij / O.M. Veresk. – L'vov: Izd-vo L'vov. politekhniki, 2013.
15. Khokh, V.D. Issledovanie metodov postroeniya ehkspertnykh sistem / V.D. Khokh, E.V. Meleshko, M.S. Yakimenko //Sistemy upravleniya, navigacii i svyazi. – 2016. – Vyp. 4(40). – S. 48–52.
16. Limarenko, V.V. Informacionnaya sistema podderzhki reshenij dlya avtomatizacii sozdaniya tekhnologicheskikh processov mekhanooobrabotki detalej vysokotochnogo oborudovaniya: dis. kand. tekhn. nauk / V.V. Limarenko. – Khar'kov, 2019.

Received (Надійшла) 30.07.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.10.2021

## ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Смірнова Тетяна Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Tetiana Smirnova** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [sm.tetyana@gmail.com](mailto:sm.tetyana@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6896-0612>

**Буравченко Костянтин Олегович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Kostiantyn Buravchenko** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [buravchenkok@gmail.com](mailto:buravchenkok@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6195-7533>

**Кравченко Сергій Сергійович** – аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

**Serhii Kravchenko** – PhD graduate student, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [krava96ch@ukr.net](mailto:krava96ch@ukr.net); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8730-9534>



**Горбов Віталій Олегович** – аспірант, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;  
**Vitalii Horbov** – PhD graduate student, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [angry.beaver1125@gmail.com](mailto:angry.beaver1125@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7551-2567>

**Смірнов Олексій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;  
**Oleksii Smirnov** – doctor of technical sciences, professor, head of cybersecurity and software academic department, Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine;  
e-mail: [dr.SmirnovOA@gmail.com](mailto:dr.SmirnovOA@gmail.com); ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9543-874X>

### **Облачная система поддержки принятия решений технологического процесса восстановления поверхностей конструкций и деталей машин**

Т. В. Смирнова, К. О. Буравченко, С. С. Кравченко, В. О. Горбов, А. А. Смирнов

**Аннотация.** Объектом исследования является процесс поддержки принятия решений технологического процесса. Предметом исследования является система поддержки принятия решений технологического процесса восстановления поверхностей конструкций и деталей машин в виде облачного сервиса. Цель работы заключается в разработке системы поддержки принятия решений технологического процесса восстановления поверхностей конструкций и деталей машин в виде облачного сервиса, что позволит в дальнейшем оптимизировать высокотехнологичные процессы предприятий разного масштаба по использованию облачных информационных технологий. В результате исследования проанализированы трудности автоматизации проектирования технологических процессов, связанные главным образом с тем, что задачи проектирования технологических процессов не имеют в настоящее время формальных методов решения. Поэтому для осуществления технологического проектирования проведена разработка формализации технологии (или ее части), то есть проведена замена (преобразования) содержательных предложений математическим аппаратом. В результате данной формализации предложена схема движения информации в процессе оптимизации технологического процесса. разработана модель реализации структуры технологического процесса, для которой определены основные входные параметры: перечень параметров, которые влияют на процесс. Также была предложена структура экспертной системы для оптимизации технологических процессов, проанализированы методы представления знаний и соответственно разработана схема потоков информации при реализации данной экспертной системы. На основе рассмотренных и разработанных методов и механизмов, используемых для разработки технологических процессов разработана структура информационной облачной системы поддержки принятия решений для автоматизации создания оптимизированных технологических процессов. С помощью использования разработанных методов и моделей, в результате проведения процесса оптимизации технологического процесса по допустимым эвристическим правилам, удалось получить множество цепей отдельно оптимизированных технологических процессов, с которой проводится многокритериальный отбор, соответствует предъявляемым требованиям оптимизации. Пользователь системы может получать в ответ как одну карточку технологического процесса, так и несколько лучших. **Выводы.** Разработанные подходы оптимизации технологических процессов были применены к решению задачи оптимизации технологического процесса электродуговой обработки. Сначала проведено формализацию технологического процесса электродуговой обработки. После этого, проведено формирование эвристических правил и базы знаний структуры технологического процесса электродуговой напыления и соответственно разработаны структуры базы знаний данного технологического процесса и диаграммы двумя использования разработанной информационной системы в виде облачного сервиса.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений; технологические процессы; облачные сервисы.

### **Cloud system for decision supporting of technological process of restoration of surfaces of structures and machine parts**

Tetiana Smirnova, Kostiantyn Buravchenko, Serhii Kravchenko, Vitalii Horbov, Oleksii Smirnov

**Abstract.** The object of research is the process of decision support of the technological process. The subject of the research is the decision support system of the technological process of restoration of surfaces of structures and machine parts in the form of cloud service. The purpose of the work is to develop a decision support system for the technological process of restoration of surfaces of structures and machine parts in the form of cloud service, which will further optimize high-tech processes of enterprises of various scales using cloud information technology. As a result of the research, the difficulties of automating the design of technological processes are analyzed, mainly due to the fact that the tasks of technological process design do not currently have formal methods of solution. Therefore, for the implementation of technological design, the development of formalization of technology (or part of it), ie the replacement (transformation) of meaningful proposals by the mathematical apparatus. As a result of this formalization, a scheme of information flow in the process of process optimization is proposed. the model of realization of structure of technological process for which the basic input parameters are defined is developed: the list of parameters influencing process. The structure of the expert system for optimization of technological processes was also proposed, the methods of knowledge presentation were analyzed and the scheme of information flows during the implementation of this expert system was developed accordingly. Based on the considered and developed methods and mechanisms used for the development of technological processes, the structure of the information cloud decision support system for automation of the creation of optimized technological processes has been developed. Using the developed methods and models, as a result of the process of process optimization according to acceptable heuristic rules, it was possible to obtain a set of chains of separately optimized technological processes, from which multicriteria selection that meets the optimization requirements. The user of the system can receive in return both one card of technological process, and some best. **Conclusions.** The developed approaches to the optimization of technological processes were applied to solve the problem of optimization of the technological process of electric arc processing. First, the technological process of electric arc processing was formalized. After that, the formation of heuristic rules and knowledge base of the structure of the technological process of electric arc spraying and accordingly developed the structure of the knowledge base of this technological process and a diagram of the use of the developed information system in the form of cloud service.

**Keywords:** decision support system; technological processes; cloud services.