

ПОШУК2019

**СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ
НА ОСНОВІ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПІДХОДУ**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	6
1.1 Аналіз стану питання організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези.....	6
1.2 Висновки по розділу	7
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ.....	9
2.1. Цільова функція продуктивності.....	10
2.2 Цільова функція надійності.....	11
2.3 Цільова функція енергоефективності.....	12
2.4 Цільова функція витрат.....	13
2.5 Висновки по розділу.....	16
3 ЕЛЕМЕНТИ ПРОЕКТУ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ.....	17
3.1 Розробка структурно-функціональної моделі	17
3.2. Розробка діаграми прецедентів	17
3.3. Розробка діаграми класів предметної області організації мультиагентної системи для структурної оптимізації конструкції фрези.....	19
3.4 Висновки по розділу.....	23
4 ЕКСПЕРИМЕНТ З ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА КРІПЛЕННЯ ПЛАСТИНИ ФРЕЗИ.....	24
4.1 Постановка експерименту.....	24
4.2 Аналіз результатів експерименту зі структурної оптимізації конструкції вузла кріплення пластини фрези.....	25
4.3 Висновки по розділу.....	28
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	31
ДОДАТОК А	34

ВСТУП

Якісне та швидке автоматизоване проектування є пріоритетною метою будь-якого машинобудівного, металургійного, транспортного або іншого виробничого підприємства, оскільки дозволяє домогтися високого економічного і технологічного ефекту.

При автоматизації проектування конструкцій ріжучого інструменту розвиток отримали, в основному, роботи по спеціальним видам інструменту, розрахункам інструменту складного профілю, а також роботи, спрямовані на параметричну оптимізацію конструкцій. На виробництві часто стає завдання не тільки створення моделі конструкції, але й вибору оптимального її варіанту з декількох можливих альтернатив з урахуванням певних обмежень, властивостей та технічних характеристик.

Розвиток сучасних систем автоматизації конструювання та інженерних розрахунків дозволив значно скоротити час на проектні роботи, що призвело до зміни методики проектування ріжучого інструменту.

На сьогодні моделі на основі агента та мультиагентні системи (МАС) – це один із підходів моделювання для розуміння динамічної поведінки складних систем. Ці моделі часто характеризуються декількома параметрами з нелінійними взаємодіями, які разом визначають динаміку глобальної системи, яка зазвичай вимірюється різними суперечливими критеріями. Одна з проблем, яка може виникнути – це налаштування параметрів керованої системи на локальному рівні, щоб досягти бажаної глобальної поведінки, а також узгодженості агентів.

Метою роботи є отримання оптимального типорозміру пластини фрези на основі оптимізації її продуктивності, надійності та енергоефективності з подальшою перевіркою розрахунком статичних характеристик вузла кріплення пластини для вибору остаточного варіанту конструкції вузла.

Розробка такого програмного продукту вносить вклад в розвиток сучасних систем автоматизації конструювання та інженерних розрахунків і тому є актуальною.

Вирішення завдань структурної і параметричної оптимізації фрези з використанням технологій штучного інтелекту на базі узгодженості роботи CAD/CAE систем і MAC становить новизну роботи.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- аналіз сучасних алгоритмів і методів, що застосовуються при вирішенні задачі структурної оптимізації ріжучого інструменту;
- вибір та удосконалення методів структурної оптимізації;
- проведення структурної оптимізації конструкції фрези з використанням технологій штучного інтелекту;
- розробка логічної моделі предметної області з використанням технології UML;
- реалізація програмного комплексу структурної оптимізації конструкції фрези на основі розроблених алгоритмів і проведення оцінки їх ефективності;
- апробація розроблених моделей і алгоритмів;
- експериментальне дослідження методів вирішення прикладного завдання для структурної оптимізації вузла кріплення пластини збірної торцевої фрези;
- аналіз результатів дослідження.

В роботі використана методика структурної, параметричної оптимізації, методика організації розподілених обчислень на базі інтелектуальних агентів. Проектування програмного продукту проведено на основі об'єктно-орієнтованого підходу та технології UML.

Запропонований в ПМК підхід дозволяє вирішувати завдання більшої складності при структурній і параметричній оптимізації конструкцій.

ПМК може бути використаний для оцінки конструктивних варіантів фрез по іншим критеріям. Для цього потрібно лише змінити математичні моделі цільових функцій.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз стану питання організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези

Генерування ідей є необхідним етапом розробки нового інструменту. Існує багато спеціальних методів для пошуку нових рішень [1, 2]. Генеруються ідеї, що стосуються створення моделей конструктивних рішень (рисунок 1) [3]. Цей процес має три рівні конструкторської розробки [4]: структури системи інструменту, структури інструменту, що входить в систему, типу конструкції кожного з модулів, які складають інструмент.

На стадії попереднього проектування доцільно застосувати морфологічний метод, у якому виділяють аналіз і синтез [5]. Метод є одним з широко вживаних комбінаторних методів оцінки існуючих і пошуку нових рішень [6; 7]. Метод дозволяє знайти і систематизувати усі можливі структури об'єкту з необхідним функціональним призначенням. Узагальнена структура класу представляється у вигляді морфологічних таблиць, що часто називаються морфологічним ящиком. Вони можуть бути як бінарними, так і багатовимірними [5, 7,8].

Ю. М. Кузнецовим морфологічний аналіз і синтез активно використовується для проектування затискних механізмів верстатів [9]. При проектуванні різального інструменту морфологічний метод застосований у С. Г. Нагорняка [10] для торцевих фрез з пружно-демпфувальними елементами, у В. А. Настасенко [11] - для стружкових канавок черв'ячних модульних фрез.

Традиційні програмні системи здатні діяти здебільшого по закладених в них чітких послідовностях. Є підходи до створення програмних комплексів побудованих як мультиагентні системи (МАС). МАС здатні орієнтуватися в складній обстановці, мати справу з нечітко

поставленими завданнями, адаптуватися до умов, що змінюються. У МАС кожній сутності ставиться у відповідність програмний агент, який представляє її інтереси [12, 13, 14].

Чим складніше виріб, тим значніше позначаються помилки при неузгодженому прийнятті рішень різними фахівцями. Як зазначається в [15] МАС добре працюють для запобігання подібних ситуацій.

У завданнях пошуку оптимального рішення кількість ітерацій залежить від обраного методу оптимізації і від розмірності простору пошуку. Найбільш ефективні підходи, що дозволяють скоротити час обчислень, це генетичні алгоритми і розподілені обчислення на основі інтелектуальних агентів [16, 17, 18].

Багато МАС мають комп'ютерні реалізації, що ґрунтовані на покроковому імітаційному моделюванні: компанія BTECH Technologies (Великобританія) використовує агентну платформу ZEUS; Comtec (Японія) – Comtec Agent Platform – JADE; Fujitsu Labs (США) – AAR; Nortel Networks (Великобританія) – FIPA-OS.

В даній роботі використовуються програмні компоненти бібліотеки Jade та мови програмування C# у середовищі Microsoft Visual Studio.

1.2 Висновки по розділу

У першому розділі був здійснений аналіз стану питання організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези. Була з'ясована актуальність використання методів морфологічного аналізу та синтезу, а також штучного інтелекту для вирішення задачі структурної оптимізації, проведено аналіз перспектив застосування означених методів.

Це дозволило виявити області застосування кожного з методів і виявлені подальші напрямки проведення дослідження.

Занадто широкий спектр функціоналу розглянутих програмних продуктів або обмеженість у складності вирішення задачі структурної оптимізації стали підставою для створення вузько спрямованого програмного забезпечення, що дозволяє вирішити завдання структурної оптимізації конструкції фрези, має інтелектуальну складову, надає візуалізацію потрібних користувачу даних та уніфіковані результати на виході.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ

Найважливішим параметром будь-якого виробу або продукції є якість. Критеріями якості можуть бути обрані будь-які об'єктивні, вимірювані якісно або кількісно, параметри обраного об'єкту [19]. В роботі [4] наведено дерево властивостей, які складають якість інструменту. До властивостей призначення віднесено продуктивність і енергоефективність. Надійність також впливає на якість інструменту і є елементом дерева.

У даній роботі досліджується конкретна технічна деталь – збірна торцева фреза. Конструкція отримана в результаті морфологічного аналізу [19]. За основні критерії оцінки її якості приймаємо: надійність, продуктивність, енергоефективність. Витрати будемо оцінювати собівартістю виготовлення.

Розглянемо вузол кріплення ріжучої пластини фрези. Вирішимо завдання пошуку її оптимальної довжини і форми – кругла або квадратна пластина.

Для проведення оптимізації потрібно привести математичну модель (цільову функцію) для кожного критерію оцінки якості фрези і обмеження. При оптимізації по цільових функціях продуктивності, надійності та енергоефективності проводиться пошук екстремуму у вигляді максимуму, а для функції собівартості – мінімуму.

Розраховуємо екстремум функції і відповідне значення глибини різання. Існує залежність довжини ріжучої пластини від глибини різання. Це відношення виражається наступним чином:

$$lp = \frac{t}{0,75}, \quad (2.1)$$

де l_p – довжина пластини, мм.

Таким чином, оптимізація по функціях дозволяє знайти відповідні значення довжини ріжучої пластини. Розраховане значення довжини пластини приводиться до найближчого більшого із стандартного ряду.

2.1. Цільова функція продуктивності

Продуктивність роботи фрези характеризується швидкістю видалення матеріалу, $\text{см}^3/\text{хв}$ за формулою [19]:

$$Q = t \cdot a_e \cdot \frac{V_f}{1000}, \quad (2.2)$$

де t – глибина різання, мм; a_e – ширина фрезування, мм; V_f – подача столу, мм/хв.

Подача столу розраховується, як:

$$V_f = f_z \cdot n \cdot z, \quad (2.3)$$

де f_z – подача на зуб, мм/зуб; n – частота обертання шпинделя, об/мин; z – кількість зубів, шт.

Частота обертання шпинделя визначається наступним чином:

$$n = 1000 \cdot \frac{V}{\pi \cdot D}, \quad (2.4)$$

де D – діаметр фрези, мм; V – швидкість різання, м/хв.

2.2 Цільова функція надійності

Надійність роботи фрези будемо характеризувати періодом стійкості, хв., що виражається формулою [19]:

$$T = \left(K_v \cdot \frac{C_v \cdot D^{q_v}}{V \cdot t^{x_v} \cdot f_z^{y_v} \cdot a_e^{u_v} \cdot z^{p_v}} \right)^{\frac{1}{m_v}}, \quad (2.5)$$

де C_v – коефіцієнт розмірностей умов обробки; D – діаметр фрези, мм; K_v – поправочний коефіцієнт; q_v , x_v , y_v , u_v , p_v , m_v – коефіцієнти розмірностей параметрів моделі; t – глибина різання, мм; a_e – ширина фрезування, мм; z – кількість зубів фрези, шт; f_z – подача на зуб, мм/зуб; V – швидкість різання, м/хв.

Поправочний коефіцієнт розраховується:

$$K_v = K_{m_v} \cdot K_{r_v} \cdot K_{i_v}, \quad (2.6)$$

де K_{m_v} – коефіцієнт, що враховує характер оброблюваного матеріалу; K_{r_v} – коефіцієнт, що враховує якість поверхні деталі; K_{i_v} – коефіцієнт, що враховує характер матеріалу ріжучої пластини.

Коефіцієнт, що враховує характер оброблюваного матеріалу:

$$K_{m_v} = \left(\frac{190}{HB} \right)^{n_v}, \quad (2.7)$$

де n_v – поправочний коефіцієнт виду матеріалу деталі; HB – твердість матеріалу деталі; коефіцієнти K_{r_v} та K_{i_v} наведені в справочних даних [20].

2.3 Цільова функція енергоефективності

Проблему ефективного енергоспоживання можна розглядати за трьома наступними напрямками [21]:

- використання різних видів енергії в умовах машинобудування;
- споживання енергії в технологічному процесі формоутворення виробів;
- особливості енергоспоживання одночасно групою пристроїв.

Відповідно другого напрямку оцінки енергоефективності роботи фрези виражаємо потужністю за формулою [19]:

$$P_c = \frac{t \cdot a_e \cdot V_f \cdot k_c}{60 \cdot 1000000 \cdot \eta}, \quad (2.8)$$

де η – коефіцієнт корисної дії, %; k_c – фактична питома сила різання, Н/мм²; t – глибина різання, мм; a_e – ширина фрезування, мм; V_f – подача столу, мм/хв.

Фактична питома сила різання виражається формулою:

$$k_c = k_{c1} \cdot hm^{-0,28}, \quad (2.9)$$

де k_{c1} – питома сила різання, Н/мм²; hm – середня товщина стружки, мм.

Середня товщина стружки розраховується як:

$$hm = \frac{\left(\sin \left(\varphi \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot a_e \cdot fz \right)}{D \cdot \arcsin \left(\frac{a_e}{D} \right)}, \quad (2.10)$$

де D – діаметр фрези, мм; fz – подача на зуб, мм/зуб; a_e – ширина фрезування, мм; φ – кут різання, °.

2.4 Цільова функція витрат

Витрати на фрезерування поверхні деталі характеризуються собівартістю, що складається з наступних частин [19]:

$$A = A_1 + A_2 + A_3, \quad (2.11)$$

де A_1 – витрати на експлуатацію верстата; A_2 – витрати на твердий сплав; A_3 – витрати на ріжучий інструмент.

Витрати на експлуатацію верстата розраховуються як:

$$A_1 = E \cdot \frac{t_{шт}}{60}, \quad (2.12)$$

де E – вартість станко часу, у. о.; $t_{шт}$ – штучний час, хв.

Штучний час визначається як:

$$t_{шт} = \frac{t_o}{0,75}, \quad (2.13)$$

де t_o – основний час, хв.

Основний час розраховується наступним чином:

$$t_o = \frac{L}{Vf}, \quad (2.14)$$

де L – шлях проходження інструменту, мм; V_f – подача столу, мм/хв.

Шлях проходження інструменту складається :

$$L = l + lvrez + lper , \quad (2.15)$$

де l – довжина оброблюваної поверхні, мм; $lvrez$ – довжина врізання, мм; $lper$ – довжина перебігу, мм.

Довжина врізання розраховується за формулою:

$$lvrez = \frac{D}{2} - 0,5 \cdot \sqrt{D^2 - ae^2} , \quad (2.16)$$

де D – діаметр фрези, мм; ae – ширина фрезування, мм.

Довжина перебігу розраховується за формулою:

$$lper = 2 \cdot fn , \quad (2.17)$$

де fn – подача столу на оборот, мм/об.

Подача столу на оборот є добутком:

$$fn = fz \cdot z \quad (2.18)$$

fz – подача на зуб, мм/зуб; z – кількість зубів, шт.

Витрати на твердий сплав складають:

$$A_2 = A_c \cdot R_c , \quad (2.19)$$

де A_c – вартість твердого сплаву, у. о.; R_c – витрати твердого сплаву для інструменту, г.

Витрати твердого сплаву для інструменту враховують наступні складові:

$$R_c = j \cdot l_p \cdot b \cdot h \cdot R_n, \quad (2.20)$$

де j – питома маса твердого сплаву, г/мм³; l_p – довжина пластини, мм; b – ширина пластини, мм; h – товщина пластини, мм; R_n – витрати пластин, шт.

Витрати пластин розраховуються як:

$$R_n = \frac{t_0}{T} \cdot z \quad (2.21)$$

де t_0 – основний час, хв; T – період стійкості, хв; z – кількість зубів фрези, шт.

Витрати на твердий сплав складають:

$$A_3 = A_i \cdot R_i, \quad (2.22)$$

де A_i – вартість інструменту (корпусу), у. о.; R_i – витрати інструменту, шт/м².

Витрати інструменту визначаються за формулою:

$$R_i = R_n / N_p \quad (2.23)$$

де R_n – витрати пластин, шт; N_p – кількість пластин, що витрачаються на термін використання корпусу, шт.

2.5 Висновки по розділу

В цьому розділі було створено математичну модель оцінки конструкції фрези, що складається з цільових функцій продуктивності, надійності, енергоефективності, витрат. Це дозволило проаналізувати алгоритми оптимізації по кожній з цільових функцій і сформувати вхідні набори даних. Дані включають технічні характеристики конструкції фрези, режими різання та параметри верстатів.

Були також вибрані величини та їх чисельні показники, що будуть виступати в якості обмежень при оптимізації.

Оптимізація по функціях продуктивності, надійності, енергоефективності дозволяє знайти відповідні значення глибини різання і перейти до значення довжини або радіусу ріжучої пластини.

3 ЕЛЕМЕНТИ ПРОЕКТУ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ

3.1 Розробка структурно-функціональної моделі

Для представлення бізнес-процесу використовуємо комплекс SADT діаграм. SADT – це методологія структурного аналізу і проектування [22].

На діаграмі (рисунок 3.1) представлені входи і виходи, учасники системи, а так само нормативні документи для здійснення процесу, вихід бізнес-процесу.

В ході аналізу проблематики предметної області, було виділено сценарій розвитку основного бізнес-процесу «Структурна оптимізація конструкції фрези». Аналізуючи предметну область слід зазначити, що основний сценарій можна розкрити більш детально, тому виконаємо декомпозицію бізнес-процесу. Його етапи визначені на SADT-діаграмі 1-го рівня, що зображена на рисунку 3.1.

3.2. Розробка діаграми прецедентів

Для створення інформаційної моделі програмного продукту використовуємо уніфіковану мову моделювання UML (Unified Modeling Language) [23], яка в графічній формі опису об'єктів дозволить моделювати різні сутності програмного забезпечення [24].

Для визначення можливостей програмного продукту використовуємо діаграму прецедентів, що описує предметну область. Головне призначення діаграми прецедентів полягає в формалізації функціональних вимог до системи за допомогою понять відповідного пакету і можливості узгодження отриманої моделі з замовником на ранній стадії проектування [25].

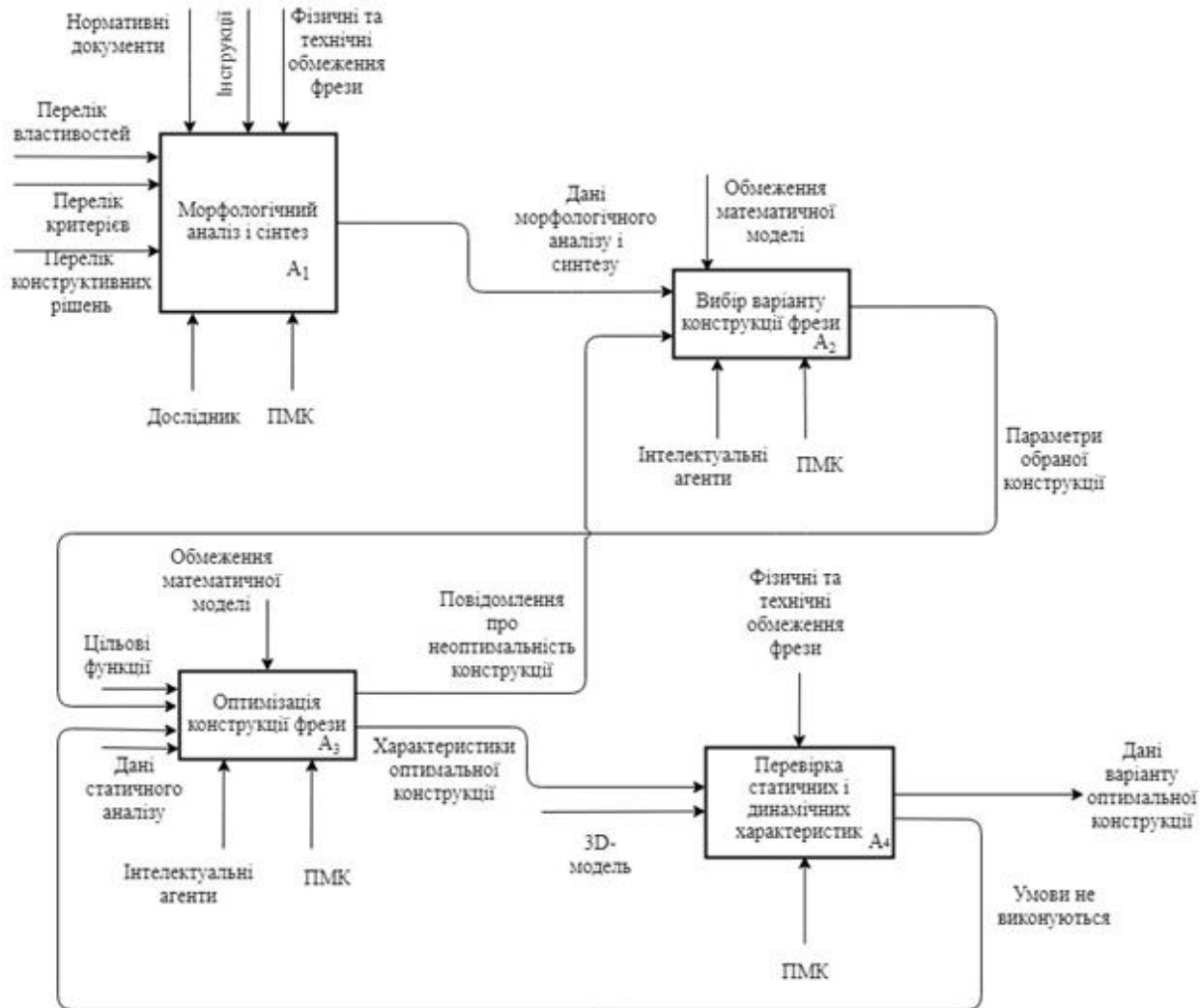


Рисунок 3.1 – Деталізована структурно-функціональна модель 1-го рівня бізнес-процесу «Структурна оптимізація конструкції фрези»

Екторами на розробленій діаграмі прецедентів будуть Дослідник 1, Дослідник 2 та Штучний інтелект. Дослідник 1 виконує дії, пов'язані з формуванням набору вхідних даних, а також ініціює побудовання 3D-моделі та запуск САЕ-розрахунку для перевірки статичних характеристик варіанту конструкції, якою займається Дослідник 2. Завдяки цій перевірці відбувається вихід з циклу оптимізації, якщо поточний варіант конструкції задовольняє необхідним умовам, або запускається наступний оптимізаційний крок. До обов'язків Штучного інтелекту входять оптимізація та вибір кінцевого варіанту з урахуванням усіх обмежень.

Діаграма прецедентів для предметної області зображена на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Діаграма прецедентів бізнес-процесу «Структурна оптимізація конструкції фрези»

3.3. Розробка діаграми класів предметної області організації мультиагентної системи для структурної оптимізації конструкції фрези

Діаграма класів (class diagram) служить для представлення статичної структури моделі системи в термінології класів об'єктно-орієнтованого програмування. Діаграма класів може відбивати, зокрема, різні взаємозв'язки між окремими сутностями предметної області, такими як об'єкти і

підсистеми, а також описує їх внутрішню структуру і типи відносин. На даній діаграмі не вказується інформація про тимчасові аспектах функціонування системи. З цієї точки зору діаграма класів є подальшим розвитком концептуальної моделі проектованої системи (рисунок 3.4).

При підключенні модуля штучного інтелекту, ініціалізується поведінка інтелектуальних агентів, що успадковують клас штучного інтелекту, визначається середовище їх функціонування та їх стан, а також дії кожного агента на основі його бази знань (правил). Після ініціалізації кожен агент оброблює морфологічну таблицю, а результати обробки передає об'єкту штучного інтелекту. Цей об'єкт реалізовує оптимізацію конструкції фрези за моделлю, яка надає кінцевий результат аналізу.

Після процесу оптимізації виконується запит до CAD/CAE-системи на побудування 3D-моделі знайденого оптимального варіанту конструктивного рішення та CAE-аналіз її статичних характеристик. Штучний інтелект отримує за запитом інтерфейс який містить результати побудови моделі і CAE-розрахунку, та перевіряє, чи виконуються всі необхідні умови. Якщо так, то обрана конструкція вважається оптимальною, якщо ні – виконується наступний крок оптимізації.

При проектуванні програмно-методичного комплексу ефективним буде застосування високорівневих патернів проектування для структурування, полегшення при побудові та управлінні об'єктів програми [26]. В даному випадку були застосовані наступні патерни: Model-View-Controller, Information Expert – розподілу обов'язків (GRASP); GoFor патерни: Facade – структурний, Singleton – породжуючий, Memento – поведінковий [27].

Патерн проектування Singleton гарантує, що в класі може бути тільки один екземпляр. В окремому випадку надається можливість наявності, заздалегідь визначеного числа екземплярів [27]. Даний патерн в поточному проекті має сенс застосувати при породженні об'єкту класу «Штучний інтелект» гарантувати наявність тільки одного екземпляру цього класу.

Патерн Facade дозволяє приховати складність системи шляхом зведення всіх можливих зовнішніх викликів до одного об'єкту, делегує їх відповідним об'єктам системи. Також він забезпечує уніфікований інтерфейс з набором розрізнених реалізацій або інтерфейсів з підсистемою, якщо небажано високий рівень зв'язування. На нього покладаються обов'язки по взаємодії з компонентами підсистеми. Фасад – це зовнішній об'єкт, що забезпечує єдину точку входу [27].

Патерн Memento дозволяє, не порушуючи інкапсуляцію, зафіксувати і зберегти внутрішній стан об'єкта так, щоб пізніше відновити його в цей стан [27]. У системі, що розроблюється, патерн використовуються, щоб можна було повернутися до одного з попередніх станів середовища для подальшої роботи з ним інтелектуального агента.

Патерн Information Expert визначає базовий принцип розподілу відповідальностей: «Відповідальність повинна бути призначена тому, хто володіє максимумом необхідної інформації для виконання обов'язків – інформаційному експерту». Локалізація відповідальностей, що проводиться згідно шаблону підвищує інкапсуляцію, простоту сприйняття та готовність компонентів для повторного використання, а також знижує ступінь зачеплення [27]. В нашому випадку інформаційним експертом буде клас «Штучний інтелект».

Патерн Model-View-Controller (MVC) являє собою схему поділу даних програми, призначеного для користувача інтерфейсу і керуючої логіки на три окремих компоненти: модель, уявлення і контролер таким чином, що модифікація кожного компонента може здійснюватися незалежно [27].

Модель (Model) надає дані і реагує на команди контролера, змінюючи свій стан. Уявлення (View) відповідає за відображення даних моделі користувачеві, реагуючи на зміни моделі. Контролер (Controller) інтерпретує дії користувача, сповіщаючи модель про необхідність змін. Моделлю даних будуть об'єкти класу «Оптимізаційна модель», контролером – об'єкт класу «Штучний інтелект», а уявленням – об'єкти класу «Результат аналізу».

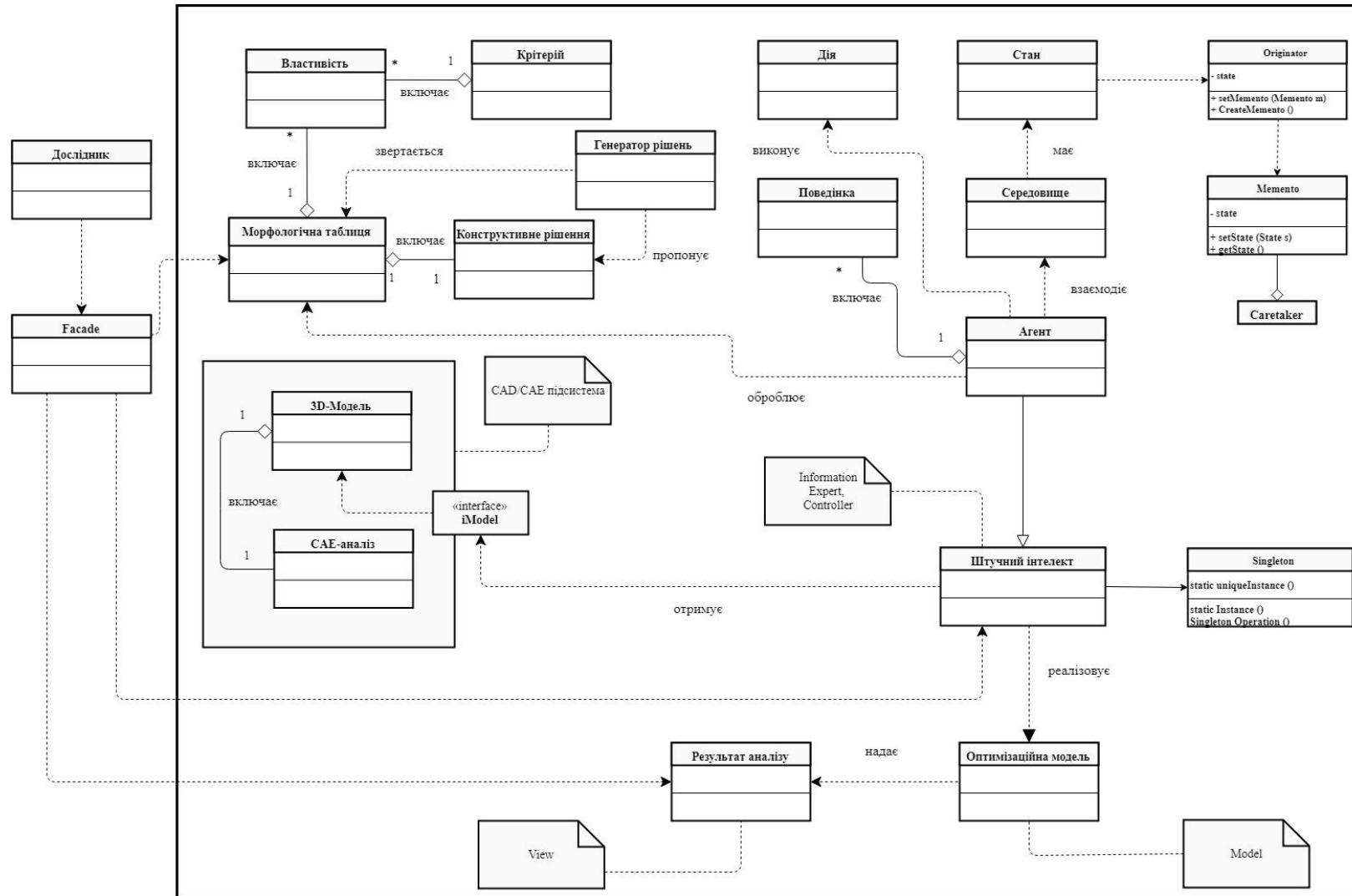


Рисунок 3.4 – Діаграма класів предметної області організації мультиагентної системи для структурної оптимізації конструкції фрези з використанням патернів проектування

3.4 Висновки по розділу

У третьому розділі була розроблена логічна та фізична модель програмного забезпечення організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези.

Застосування на етапі проектування шаблонів (патернів) покращує повторне використання коду, знижує зв'язність та підвищує зачіплюваність.

Це дозволило розробити технічний та робочий проекти програмно-методичного комплексу мультиагентної системи для структурної оптимізації конструкції фрези.

4 ЕКСПЕРИМЕНТ З ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА КРІПЛЕННЯ ПЛАСТИНИ ФРЕЗИ

4.1 Постановка експерименту

Метою експерименту є проведення структурної оптимізації конструкції вузла кріплення пластини фрези по цільовим функціям продуктивності, надійності і енергоефективності з подальшою перевіркою його статичних характеристик за допомогою САЕ-аналізу.

В ході експерименту будемо шукати оптимальні чисельні значення параметрів довжини (діаметру) та товщини ріжучої пластини із стандартного ряду для обраної форми (кругла, квадратна) пластини збірної торцевої фрези.

Початкові дані вводяться з елементів форми (рисунок 4.1), а також завантажуються з бази даних. Змінним фактором є глибина різання, оптимізація якої дозволяє перейти до розмірних параметрів пластини.

Розглянемо п'ять варіантів оптимізації розміру для круглої та квадратної форми ріжучої пластини: за функцією продуктивності (Q); за функцією надійності (T); за функцією енергоефективності (Pc); за функціями продуктивності та енергоефективності; за функціями надійності та енергоефективності. При оптимізації за більш ніж однією функцією остаточна відповідь надається за допомогою розрахунку функції витрат.

Побудуємо таблицю початкових даних (таблиця А.1). Оптимізацію за енергоефективністю проведемо для п'яти обраних моделей верстатів за цільовою функцією (формула 2.8) з незмінними іншими параметрами. Для інших варіантів оптимізації (формули 2.2, 2.5, 2.11) обраний верстат Skoda W200HC з ККД 85% та потужністю двигуна головного приводу 83 кВт.

Дослідження проведено для умовної поверхні деталі з сірого чавуну розміром 1 м^2 . Вихідними значеннями є характеристики оброблюваного матеріалу, та режими різання при механічній обробці.

Змінна t , мм – глибина різання, буде обмежена від величини $t_{\min} = 1$ мм до величини t_{\max} , що визначається: $t_{\max} \leq 0,75 \cdot lp_{\max}$, де lp_{\max} – максимальна довжина ріжучої пластини зі стандартного ряду для квадратної форми пластини, мм; $t_{\max} \leq r$, де r – радіус пластини із стандартного ряду для круглої форми пластини, мм.

Обрані моделі станків: розточувальний колонний Skoda W200HC – 83/0,85 (потужність двигуна головного приводу/ККД двигуна); вертикальний фрезерний 6M13П – 10/0,8; поздовжній фрезерний Ferrari S620 – 36/0,85; розточувальний столиковий 2A637Ф1 – 22/0,8; розточувальний колонний Шибатура BSF 34/23A – 90/0,85.

4.2 Аналіз результатів експерименту зі структурної оптимізації конструкції вузла кріплення пластини фрези

Головне вікно програмного комплексу представлено на рисунку 4.1. В даній роботі для побудови мультиагентної системи використовується бібліотека Jade.

Результати розрахунку і оптимізації за вибраними критеріями являють собою обрану форму ріжучої пластини та її розміри, а також числові значення критеріїв оптимізації. Для обраної форми пластини розробляється конструкція вузла її кріплення в CAD-системі.

Побудуємо графіки залежності цільових функцій від глибини різання за наведеними чисельними розрахунками. Порівняємо чисельні характеристики кінцевих даних за результатами оптимізації з різними початковими умовами. На рисунку А.1 показано залежність функції продуктивності від глибини різання. Продуктивність змінюється в діапазоні $0 - 500 \text{ см}^3/\text{хв}$, а глибина різання $1,9 - 11,9$ мм. Графік залежності лінійний, тому оптимальне значення

знаходяться на кордоні обмежень. В даному випадку $t = 11.9$ мм, що відповідає довжині ріжучого леза 19,05 мм.

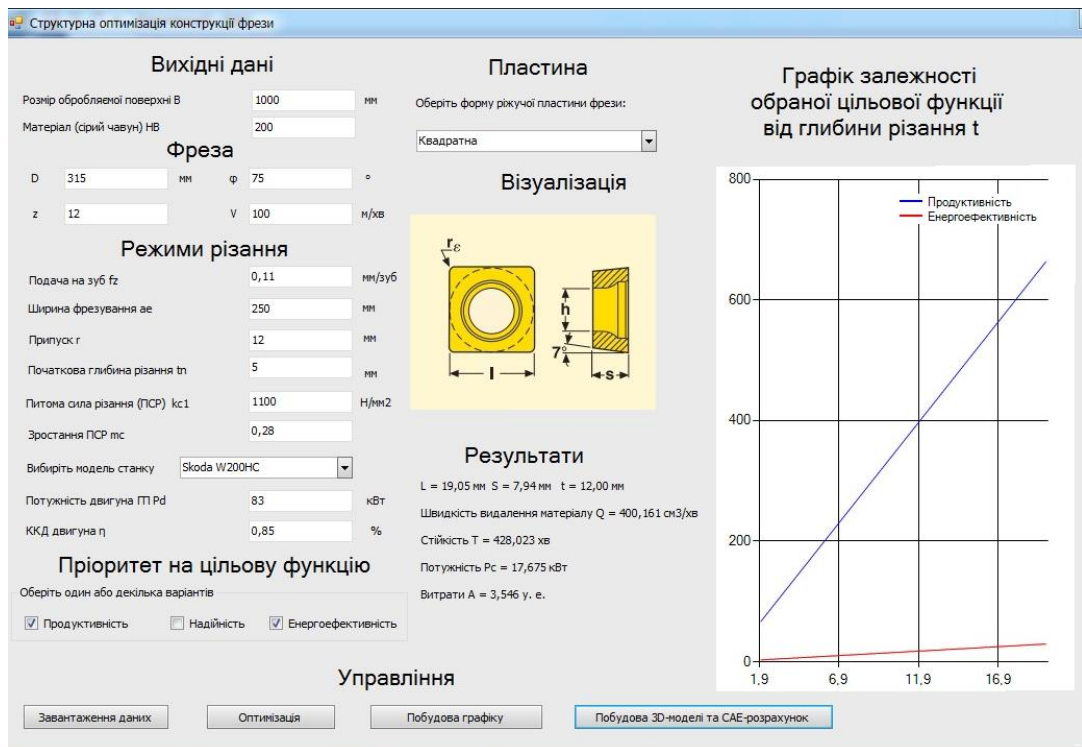


Рисунок 4.1 – Головне вікно програми з результати оптимізації за функціями продуктивності і енергоефективності

Графік залежності функції надійності від глибини різання нелінійний, тому має точку екстремуму (рисунок А.2). Для заданих початкових умов значення стійкості пластини коливаються в межах 300 хв – 700 хв, а глибина різання в межах 3,8 мм – 17,8 мм. Максимальне значення стійкості відповідає глибині різання 3,8 мм. Тоді довжина ріжучого леза дорівнює 5,56 мм для квадратної пластини, а для круглої пластини діаметр дорівнює 6,35 мм.

Залежність функції енергоефективності від глибини різання для верстата 2А637Ф1 показано на рисунку А.3. Енергоефективність змінюється в діапазоні 0 – 20 квт, а глибина різання 4,9 – 11,3 мм. Графік залежності лінійний, тому оптимальне значення знаходяться на кордоні обмежень. В даному випадку $t = 11,3$ мм, що відповідає довжині ріжучого леза 15,85 мм.

Залежність функції енергоефективності від глибини різання для верстата Ferrari S620 показано на рисунку А.4. Енергоефективність змінюється в діапазоні 0 – 40 кВт, а глибина різання 4,9 – 19,9 мм. Графік залежності лінійний, тому оптимальне значення знаходяться на кордоні обмежень. В даному випадку $t = 14,3$ мм, що відповідає довжині ріжучого леза 19,05 мм.

Розглянемо залежності на рисунку А.5 і рисунку А.6. Функції продуктивності і надійності сильно залежать від глибини різання порівняно з функцією енергоефективності.

Так при зміні t від 1,9 мм до 3,9 мм (рисунок А.5) значення надійності T змінюються від 1000 хв до 597 хв, а енергоефективності P_c від 1 до 5,7. При зміні t від 1,9 мм до 12 мм (рисунок А.6) значення продуктивності Q змінюються від $100 \text{ см}^3/\text{хв}$ до $400 \text{ см}^3/\text{хв}$, а енергоефективності P_c від 1 кВт до 17 кВт.

Результати експерименту також наведені у таблиці А.2 і таблиці А.3. Аналіз показав, що глибина різання і відповідно розміри пластини найбільші при оптимізації за функціями продуктивності та енергоефективності, а найменші при оптимізації за функцією надійності. В залежності від вимог виробництва пріоритетною цільовою функцією може виступати як функція продуктивності, так і функція надійності. Найбільші значення витрат отримані при оптимізації по функції продуктивності, а найменші – для функції надійності.

Остаточний варіант типорозміру пластини обирається після побудови 3D-моделі фрези та перевірки напруження і деформацій вузла кріплення ріжучої пластини з використанням САЕ-розрахунку.

Порівняємо статичні характеристики пластин, розміри яких знайдено при оптимізації по енергоефективності: кругла пластина діаметром 15,58 мм і квадратна пластина з довжиною ріжучого леза 19,05 мм (рисунок А.7).

Побудуємо 3D-моделі фрези з цими пластинами. Кнопка «Побудова 3D-моделі та САЕ-розрахунок» на формі програмного комплексу (рисунок 4.1)

надає можливість виконати макрос засобами зовнішньої САД-системи і таким чином виконати формування 3D-моделей фрези (рисунок А.8) [28].

Проведемо в Solid Simulation САЕ-аналіз для вузла кріплення круглої і квадратної пластини. Результати розрахунку для квадратної пластини приведені на рисунку А.9 і рисунку А.10. Результати САЕ-аналізу візуалізуються за допомогою САД-системи .

Розрахунок показав, що кругла пластина з діаметром пластини 16 мм не відповідає умовам еквівалентних напружень. Межа плинності матеріалу ріжучої пластини дорівнює 1270 МПа. Максимальні напруження для ножа фрези з діаметром пластини 16 мм не відповідають умовам межі плинності. Їх значення досягає 2683 МПа.

Для квадратної пластини з розміром ріжучої кромки 19 мм (з того ж самого матеріалу) напруження досягають лише 1149 МПа, що надає переваги до використання саме такого типорозміру пластини.

За результатами САЕ-аналізу в якості остаточного варіанту конструкції приймаємо фрезу з пластиною квадратної форми та довжиною ріжучої кромки 19,05 мм і товщиною 7,94 мм. Пластина такої форми та розміру відповідає вимогам стійкості до напружень і деформацій.

4.3 Висновки по розділу

В ході експерименту з структурної оптимізації конструкції вузла кріплення ріжучої пластини фрези за допомогою розробленої мультиагентної системи були проаналізовані різні варіанти конструкції фрези при різних режимах роботи (з пріоритетом на продуктивність, надійність, енергоефективність або на їх комбінації) на п'яти обраних верстатах різних типів.

За результатами експерименту були побудовані 3D-моделі обраних в результаті оптимізації варіантів конструкції фрези з різними типорозмірами пластин, а також проведений їх САЕ-аналіз. Це дозволило обрати остаточний варіант конструкції фрези.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Здійснений аналіз стану питання організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези. Була з'ясована актуальність використання методів морфологічного аналізу та синтезу, а також штучного інтелекту для вирішення задачі структурної оптимізації, проведено аналіз перспектив застосування означених методів. Це дозволило виявити області застосування кожного з методів і виявлені подальші напрямки проведення дослідження.

Було створено математичну модель оцінки конструкції фрези, що складається з цільових функцій продуктивності, надійності, енергоефективності, витрат. Це дозволило проаналізувати алгоритми оптимізації по кожній з цільових функцій і сформулювати вхідні набори даних.

Оптимізація по функціях продуктивності, надійності, енергоефективності дозволяє знайти відповідні значення глибини різання і перейти до значення довжини або діаметру ріжучої пластини.

Розроблена логічна модель програмного забезпечення організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези. Це дозволило розробити технічний та робочий проекти програмно-методичного комплексу мультиагентної системи для структурної оптимізації конструкції фрези.

В ході експерименту з структурної оптимізації конструкції вузла кріплення ріжучої пластини фрези за допомогою розробленої мультиагентної системи були проаналізовані різні варіанти конструкції фрези при різних режимах роботи (з пріоритетом на продуктивність, надійність, енергоефективність або на їх комбінації) на п'яти обраних верстатах різних типів.

За результатами експерименту були побудовані 3D-моделі обраних в результаті оптимізації варіантів конструкції фрези з різними типорозмірами пластин, а також проведений їх САЕ-аналіз. Це дозволило обрати остаточний варіант конструкції фрези.

ПМК може бути використаний для оцінки конструктивних варіантів фрез по іншим критеріям. Для цього потрібно лише змінити математичні моделі цільових функцій.

Запропонований в ПМК підхід дозволяє вирішувати завдання більшої складності при структурній і параметричній оптимізації конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Быков, В. В. Исследовательское проектирование в машиностроении / В. В. Быков, В. П. Быков. М.: Машиностроение, 2011. – 256 с.
- 2 Asunción, Álvarez. Applications of General Morphological Analysis From Engineering Design to Policy Analysis / Asunción Álvarez and Tom Ritchey // Acta Morphologica Generalis AMG. Swedish Morphological Society. – 2015. – Vol. 4, No. 1. – 40 p
- 3 Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем : монографія / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, П. І. Сагайда, Л. В. Васильєва, В. Л. Аносов. – Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. – 239 с.
- 4 Хае́т Г. Л. Сборный твердосплавный инструмент / Г. Л. Хае́т, В. М. Гах, К. Г. Громаков и др. ; под общ ред. Г.Л. Хае́та. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.
- 5 Одрин, В. М. Метод морфологического анализа технических систем / В. М. Одрин. – М. : ВНИИПИ, 1989.–312 с.
- 6 Андрейчиков, А. В. Компьютерная поддержка изобретательства (методы, системы, примеры применения) / А.В. Андрейчиков, О.Н Андрейчикова. – М.: Машиностроение, 1998. –476 с.
- 7 Гузенко, В. С. Направленный морфологический анализ и синтез инструмента для особо тяжелых условий резания / В. С. Гузенко // Надежность режущего инструмента. – Краматорск: КИИ, 1991. –Вып.4 – С.83–91.
- 8 Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням CAD/CAM/CAE-систем: монографія / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, П. І. Сагайда, Л. В. Васильєва, В. Л. Аносов. – Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. – 239 с. ISBN 978-966-379-772-4.

9 Кузнецов, Ю. М. Теорія технічних систем / Кузнецов Ю. М., Луців І. В., Дубиняк С. А. ; під заг. ред. проф. Ю. М. Кузнецова. – К.–Тернопіль : ТДТУ, 1997. – 310 с.

10 Нагорняк, С. Г. Синтез сборных торцовых фрез с упругодемпфирующими элементами / С. Г. Нагорняк, К. В. Зеленський // Известия вузов. Машиностроение. – 1991. – № 10–12. – С. 123–125.

11 Настасенко, В. А. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений / Настасенко В. А. – К. : Техніка, 1994. – 44 с.

12 Субботин С.О., Олейник А.О., Олейник О.О. Неитеративные, эволюционные и мультиагентные методы синтеза нечеткологических и нейросетевых моделей: Монография / Под. ред. С.О. Субботина. – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 375 с.

13 Gerhard Weiss, ed. by, Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, MIT Press, 1999, ISBN 0-262-23203-0.

14 Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход, 2-е изд. –Перевод с англ. – М. : ООО «И.Д.Вильямс», 2016. – 1408 с., ISBN 978-5-8459-1968-7.

15 Лахин О. И. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия согласованных решений при проектировании малоразмерных космических аппаратов на основе мультиагентных технологий / О. И. Лахин, Е. В. Симонова, П. О. Скобелев // Информационно-управляющие системы. – №2.– 215. – С. 43 – 47

16 Козырева В. В. Автоматизация вариантного проектирования конструкций на основе систем агентов с адаптивным поведением: автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук : 05.13.12 защищена: 12.05.13 / В. В. Козырева. – Москва, 2013. – 19 с.

17 Литвиненко В. А. Организация распределенных вычислений на основе мультиагентного подхода / В. А. Литвиненко, С. А. Ховансков // Известия ТРТУ – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2007, С. 246 – 251

18 Набока М. В. Проектирование систем управления сложными информационными процессами с применением многоагентной технологии: автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук : : 05.13.12 / М. В. Набока. – Волгоград, 2004. – 20 с.

19 Теория проектирования инструмента и его информационное обеспечение: маркетинг, квалиметрия, надежность и оптимизация / Г. Л. Хаеа [и др.] ; под общ.ред. Г. Л. Хаеа. – Краматорск : ДГМА, 1994. –370 с.

20 Патент №32129 Україна, МПК (2006) В23 С5/02 Фреза торцева зі ступінчастою схемою різання / Гузенко В.С., Бабін О.Ф., Аносов В.Л.; № и 2007 12614. Заявлено 14.11.2007, опубліковано 12.05.2008 р. Бюл.№9 // Промислова власність. – 2008 №9.

21 Гузенко В. С. Энергосбережение в металлообработке: монографія / В. С. Гузенко, А. В. Маковецкий, Е. В. Мироненко, В. В. Маковецкий, В. И. Чередниченко. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 264 с.

22 Дэвид А. Марка, Клемент Л. Мак Гоуэн Методология структурного анализа и проектирования SADT. – М.: 1993. – 242 с.

23 Ларман К. Применение UML и шаблонов проектирования. - М.: Вильямс, 2002. – 624 с.

24 Буч Г. Язык UML: Руководство пользователя/ Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон; Пер. с англ.- М.: ДМК, 2000. – 432 с.

25 Liviu Panait, Sean Luke: Cooperative Multi-Agent Learning: The State of the Art. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 11(3): 387—434 (2005)

26 Рамбо Д. UML: Специальный справочник / Д. Рамбо, А. Якобсон, Г. Буч. - СПб.: Питер, 2002. – 656 с.

27 Гамма Э. Приёмы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р.Джонсон, Дж. Влссидес. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Початкові дані для проведення експерименту

Параметр	Числове значення	Одиниця вимірювання
Ширина фрезування a_e	250	мм
Подача на зуб f_z	0,1-0,25	мм/зуб
Кількість зубів z	12	шт
Швидкість різання V	100	м/хв
Діаметр фрези D	315	мм
Коефіцієнт розмірностей умов обробки C_v	445	-
Коефіцієнт якості поверхні K_{pv}	1	-
Коефіцієнт матеріалу ріжучої частини K_{iv}	1	-
Коефіцієнт обробки матеріалу K_{mv}	0,95	-
q_v	0,2	-
M_v	0,32	-
x_v	0,15	-
y_v	0,35	-
p_v	0	-
uv	0,2	-
Твердість матеріалу деталі НВ	200	-
Питома сила різання k_{s1}	1100	Н/мм ²
Кут різання φ	75	°
Вартість станкочасу E	20	у. о.
Вартість твердого сплаву A_c	0,06	у. о.
Вартість інструменту A_i	80	у. о.
Питома маса твердого сплаву	0,015	г/мм ³
Кількість пластин, що витрачаються на термін використання корпусу N_p	50	шт
Припуск	12	мм

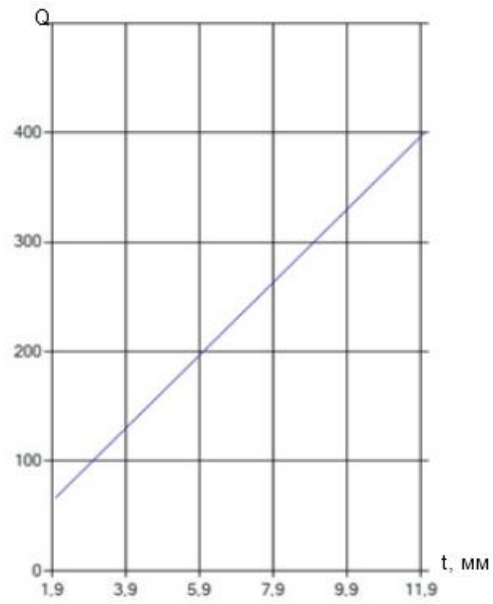


Рисунок А.1 – Графік залежності функції продуктивності від глибини різання

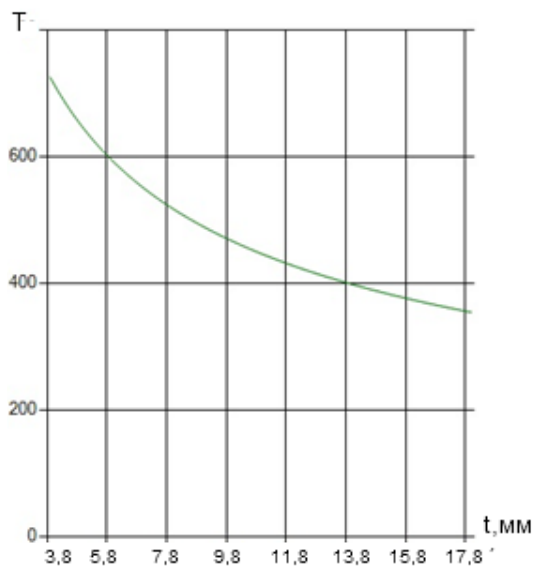


Рисунок А.2 – Графік залежності функції надійності від глибини різання

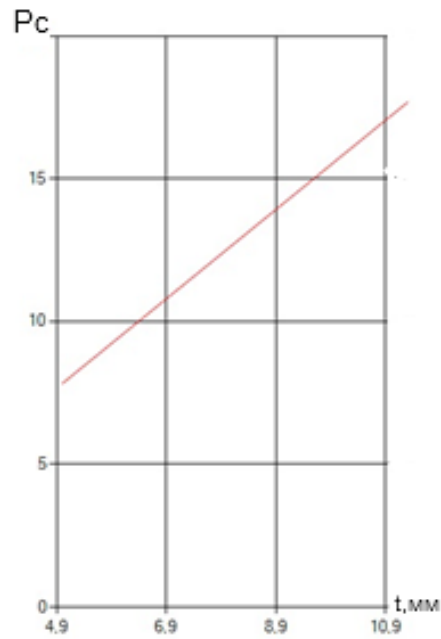


Рисунок А.3 – Графік залежності функції енергоефективності від глибини різання для верстата 2A637Ф1

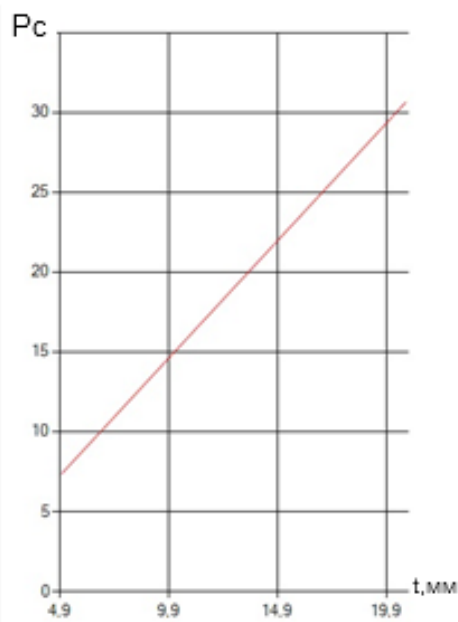


Рисунок А.4 – Графік залежності функції енергоефективності від глибини різання для верстата Ferrari S620

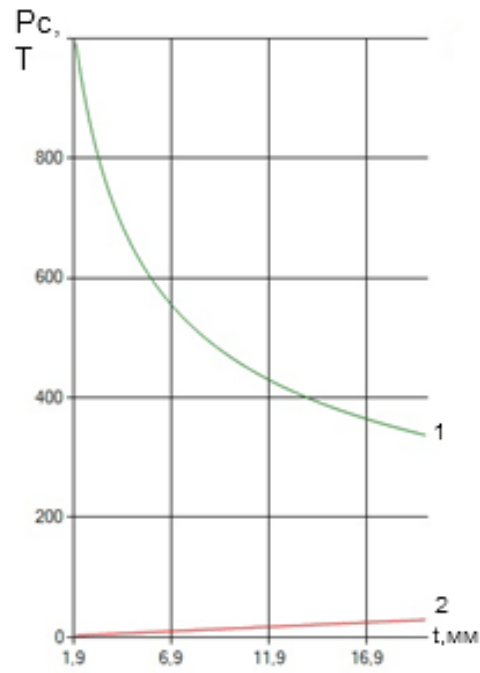


Рисунок А.5 – Графіки залежності функцій надійності (1) та енергоефективності (2) від глибини різання t

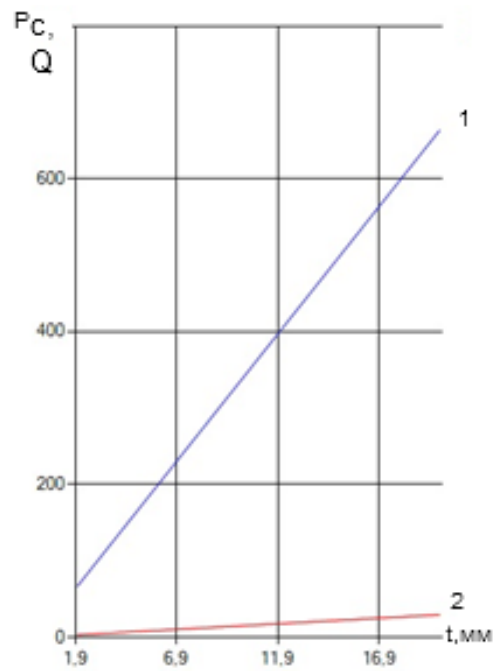


Рисунок А.6 – Графіки залежності продуктивності (1) та енергоефективності (2) від глибини різання t

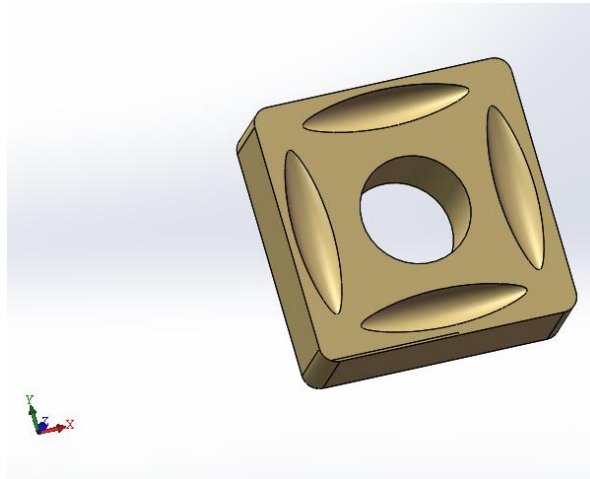


Рисунок А.7 – 3D-модель ріжучої пластини фрези в SolidWorks

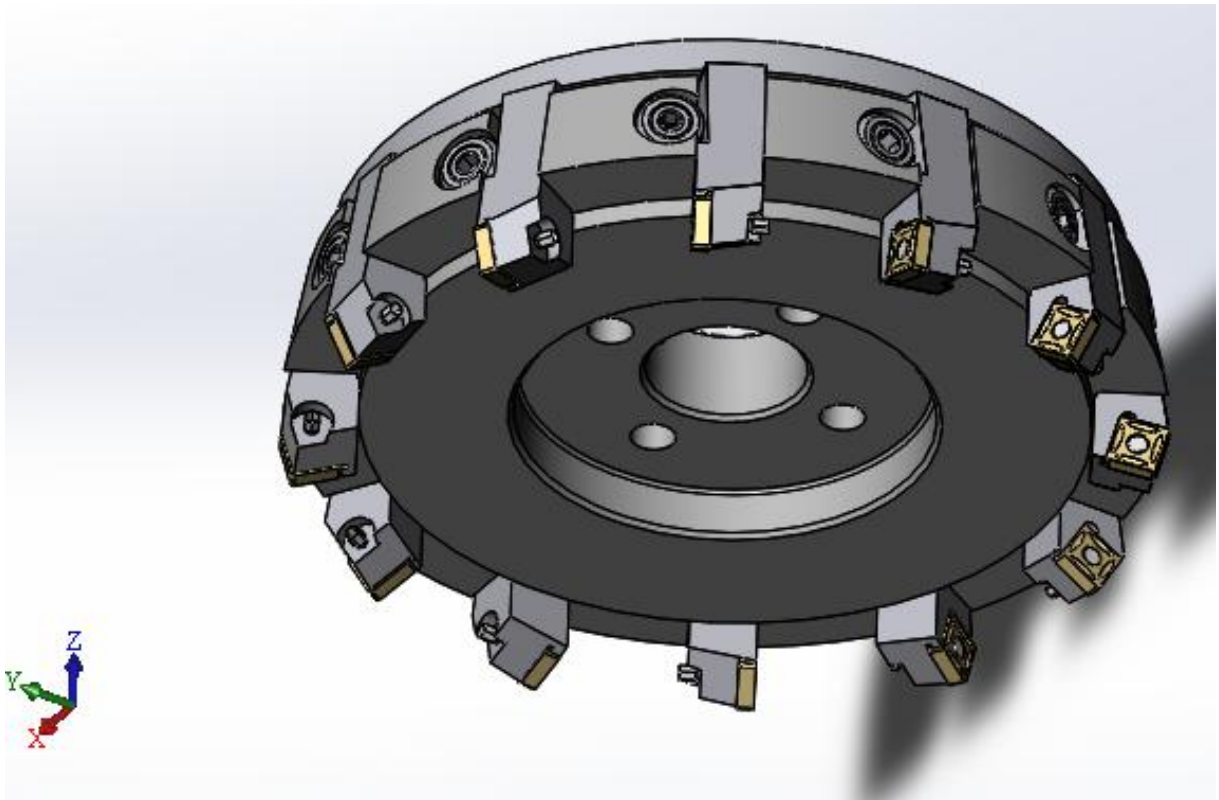


Рисунок А.8 – 3D-модель фрези в SolidWorks з квадратною пластиною

Таблиця А.2 – Результати експерименту з оптимізації за функціями продуктивності, надійності, енергоефективності та їх можливих комбінацій (модель верстату – Skoda W200HC)

Пріоритетна функція	Форма пластини	Характеристики						
		Довжина (діаметр) пластини, мм	Товщина пластини, мм	Глибина різання, мм	Швидкість видалення матеріалу, см ³ /хв.	Стійкість, хв.	Потужність, кВт	Витрати, у. о.
Продуктивність	кругла	19,05	7,94	12	400,161	428,023	17,675	3,627
	квадратна	19,05	7,94	12	400,161	428,023	17,675	3,627
Надійність	кругла	6,35	3,18	3,9	130,052	724,89	5,744	3,55
	квадратна	5,56	2,38	3,9	130,052	724,89	5,744	3,55
Енергоефективність	кругла	19,05	7,94	14,3	597,309	223,705	70,551	3,7
	квадратна	19,05	7,94	14,3	597,309	223,705	70,551	3,7
Продуктивність і енергоефективність	кругла	19,05	7,94	12	400,161	428,023	17,675	3,546
	квадратна	19,05	7,94	12	400,161	428,023	17,675	3,546
Надійність і енергоефективність	кругла	6,35	3,18	3,9	130,052	724,89	5,744	3,55
	квадратна	3,97	1,59	3,9	130,052	724,89	5,744	3,55

Таблиця А.3 – Результати експерименту з оптимізації за функцією енергоефективності при різних варіантах моделі верстату та його параметрів (форма пластини – кругла)

Пріоритетна функція	Модель верстату	Характеристики						
		Діаметр пластини, мм	Товщина пластини, мм	Глибина різання, мм	Швидкість видалення матеріалу, см ³ /хв.	Стійкість, хв.	Потужність, кВт	Витрати, у. о.
Енергоефективність	Skoda W200HC	19,05	7,94	14,3	597,309	223,705	70,551	3,7
	Ferrari S620	19,05	7,94	14,3	693,612	330,743	30,636	3,65
	Шібаура BSF34/23A	19,05	7,94	14,3	1734,031	215,257	76,59	3,706
	2A637Ф1	15,85	6,35	11,3	376,818	440,254	17,684	3,598
	6M13П	7,94	3,97	5,2	173,403	633,442	8,138	3,558

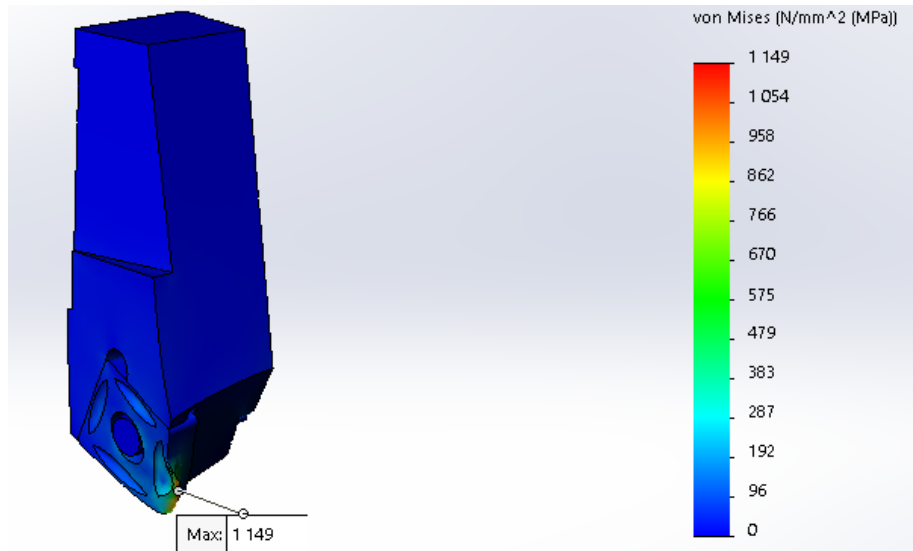


Рисунок А.9 – Епюра напружень квадратної ріжучої пластини

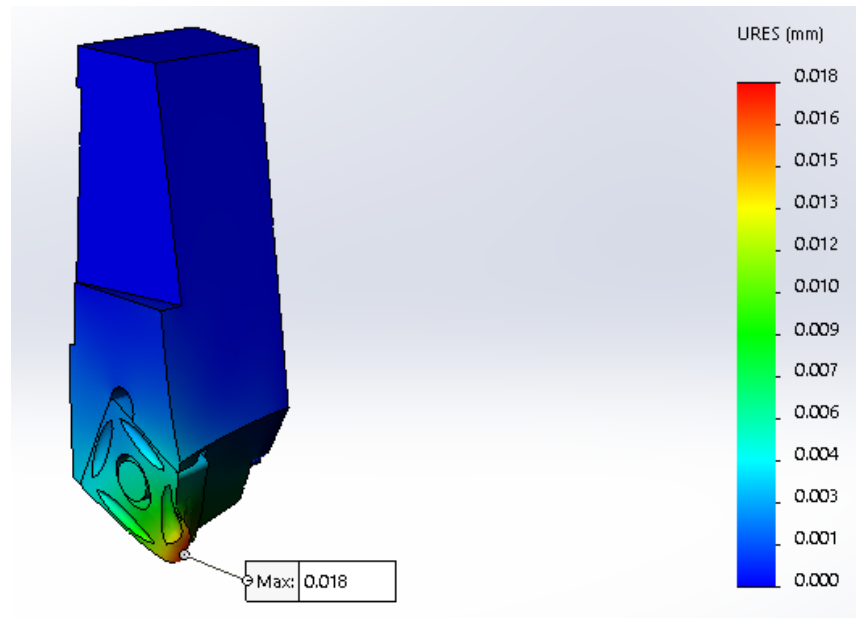


Рисунок А.10 – Епюра абсолютної деформації квадратної ріжучої пластини фрези в Solid Simulation

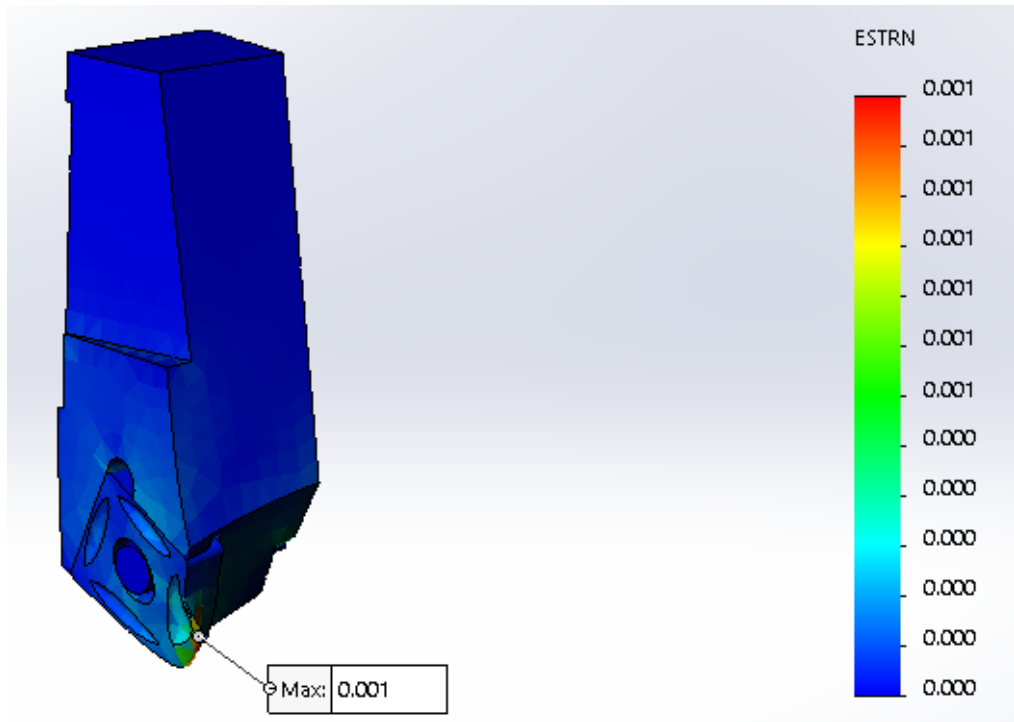


Рисунок А.11 – Епюра відносної деформації квадратної ріжучої пластини фрези в Solid Simulation

Анотація наукової роботи під шифром «пошук2019»

Метою роботи є отримання оптимального типорозміру пластини фрези на основі оптимізації її продуктивності, надійності та енергоефективності з подальшою перевіркою розрахунком статичних характеристик вузла кріплення пластини для вибору остаточного варіанту конструкції вузла.

Розробка такого програмного продукту вносить вклад в розвиток сучасних систем автоматизації конструювання та інженерних розрахунків і тому є актуальною.

Вирішення завдань структурної і параметричної оптимізації фрези з використанням технологій штучного інтелекту на базі узгодженості роботи CAD/CAE систем і MAC становить новизну роботи.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання: аналіз сучасних алгоритмів і методів, що застосовуються при вирішенні задачі структурної оптимізації ріжучого інструменту; вибір та удосконалення методів структурної оптимізації; проведення структурної оптимізації конструкції фрези з використанням технологій штучного інтелекту; розробка логічної моделі предметної області з використанням технології UML; реалізація програмного комплексу структурної оптимізації конструкції фрези на основі розроблених алгоритмів і проведення оцінки їх ефективності; апробація розроблених моделей і алгоритмів; експериментальне дослідження методів вирішення прикладного завдання для структурної оптимізації вузла кріплення пластини збірної торцевої фрези; аналіз результатів дослідження.

В роботі використана методика структурної, параметричної оптимізації, методика організації розподілених обчислень на базі інтелектуальних агентів. Проектування програмного продукту проведено на основі об'єктно-орієнтованого підходу та технології UML.

Запропонований в ПМК підхід дозволяє вирішувати завдання більшої складності при структурній і параметричній оптимізації конструкцій.

ПМК може бути використаний для оцінки конструктивних варіантів фрез по іншим критеріям. Для цього потрібно лише змінити математичні моделі цільових функцій.

Резюме

Робота починається з вступу.

Перший розділ роботи містить аналіз стану питання організації мультиагентних систем для структурної оптимізації конструкції фрези.

Математична модель для оцінки конструкції фрези розглядається в другому розділі. Вона складається з цільових функцій для оптимізації продуктивності, надійності, енергоефективності фрези. Також розраховуються витрати на обробку деталі.

Елементи проекту для створення програмного продукту як мультиагентної системи для структурної оптимізації конструкції вузла кріплення пластини торцевої фрези наведено в третьому розділі. Це структурно-функціональна модель, розроблена з використанням SADT методології; діаграма прецедентів, що представляє вимоги до функціональних можливостей програми; діаграма класів предметної області; діаграма послідовності дій.

Четвертий розділ присвячено опису експерименту з вибору конструкції вузла кріплення пластини торцевої фрези. Вибір ґрунтується на розрахунку довжини ріжучого леза квадратної пластини або радіусу круглої пластини. Далі виконується створення 3D-моделі фрези з вибраним вузлом кріплення під квадратну або круглу пластину в CAD-системі і розрахунок статичних характеристик елементів конструкції в CAE-системі.

В кінці роботи наведено список використаної літератури.