

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Фролов В'ячеслав Вікторович

УДК 658.512+621.91:004.8

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ
МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ОСНОВІ ЕВОЛЮЦІЙНИХ МЕТОДІВ**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті ім. В.Н. Каразіна, Міністерство освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор Жолткевич Григорій Миколайович, Харківській національний університет ім. В.Н. Каразіна, завідувач кафедри теоретичної та прикладної інформатики.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Глоба Лариса Сергіївна, Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут», завідувача кафедрою інформаційно-телекомунікаційних мереж;

доктор технічних наук, професор Гоменюк Сергій Іванович, Запорізький Національний університет, декан математичного факультету;

доктор технічних наук, професор Нефьодов Леонід Іванович, Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедрою автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться « 29 » жовтня 2013 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий 27.09.2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.В. Безкоровайний

ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне багатомономенклатурне виробництво потребує від технологічної підготовки виробництва (ТПВ) підприємства скорочення строків освоєння нових виробів і підвищення якості проектів. Скорочення строків забезпечується за рахунок застосування концепції CALS, що на рівні програмного забезпечення реалізується PLM – системами і PDM – системами, а на рівні інформаційного обміну стандартами типу STEP. Підвищення якості проектів забезпечується за рахунок прийняття оптимальних, для конкретних умов підприємства, рішень. При розв'язанні задач ТПВ використовується багато цільових функцій різних за топологічними властивостям, які викликають значні труднощі з їх аналітичним описом. Тому для розв'язання конкретної задачі доводиться підбирати окремий метод оптимізації, що приводить до великої кількості різноманітних методів оптимізації в рамках ТПВ. При розробці САПР для проектування технологічних систем механічної обробки, у цьому випадку, необхідно реалізувати всю множину оптимізаційних алгоритмів, які не мають єдиної методологічної основи, як на програмному, так і на інформаційному рівнях. Це приводить до складностей при розробці об'єктно-орієнтованого програмного забезпечення та проблем інтеграції на рівні інформаційних моделей різних задач проектування. Тому розробка методів комбінаторно-оптимізаційного проектування технологічних систем механічної обробки, що мають єдину методологічну основу та дозволяють реалізувати принципи інтеграції та інваріантності, є актуальною проблемою для розробників САПР технологічного призначення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в рамках загального напрямку наукової діяльності кафедри теоретичної та прикладної інформатики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна «Математичне та комп'ютерне моделювання інформаційних процесів в складних природних та технічних системах» (номер державної реєстрації 0112U002098). У рамках зазначеного напрямку здобувачем розроблялись математичні та інформаційні моделі технологічної структури, машинобудівних деталей, технологічної системи на рівні операції.

Початковий етап робіт відображено при впровадженні розробок і рекомендацій, за господарським договором № 23846 від 1 квітня 2008 р. про науково-дослідну роботу «Розробка інженерних методик організаційно-технологічного моделювання та проектування технологічних систем механообробки» разом із Державним підприємством Харківський машинобудівний завод «ФЕД». У рамках зазначеної теми здобувачем розроблявся метод вибору маршрутів обробки поверхонь високоточних машинобудівних деталей.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення рівня автоматизації проектних робіт, зниження їх трудомісткості та затрат на виправлення помилок проектування за рахунок комплексної науково-обґрунтованої системи математичних моделей, методів, інформаційних технологій для проектування технологічних систем механічної обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити основні проблеми практичної реалізації існуючих методів автоматизації проектування технологічних систем механічної обробки;

2. Визначити найбільш ефективні напрямки застосування генетичних алгоритмів (ГА) при автоматизованому проектуванні технологічних систем і запропонувати концептуальну модель ГА, що враховує особливості предметної області;

3. Розробити еволюційний метод структурного синтезу технологічних систем механічної обробки, що забезпечує формування технологічної структури раціональної по мінімуму сумарної трудомісткості з урахуванням взаємозв'язку маршруту обробки на рівні деталі та маршрутів обробки окремих поверхонь;

4. Розробити еволюційний метод дворівневого вибору найбільш раціонального сполучення засобів технологічного оснащення і їхніх параметрів для конкретної технологічної структури за заданими критеріями ефективності на кожному рівні;

5. Розробити математичну та інформаційну моделі машинобудівної деталі для еволюційних методів проектування технологічних систем, які враховують ієрархічні зв'язки конструктивних елементів, що визначають технологічну структуру механічної обробки, і принципи інформаційної єдності в CALS;

6. Розробити еволюційний метод для автоматизації розрахунку конструкторських і технологічних розмірних ланцюгів, що дозволяє вибрати найбільш раціональне сполучення допусків і відхилень складових ланок, з урахуванням особливостей механічної обробки поверхонь і максимального використання допуску замикаючої ланки;

7. Розробити методи кількісного аналізу правильності проставлення розмірів для автоматизації вхідного технологічного контролю робочих креслень деталей;

8. Розробити програмне забезпечення еволюційних методів автоматизації технологічного проектування на основі принципів інваріантності та інформаційної єдності в САПР.

Об'єкт дослідження – процес проектування технологічних систем механічної обробки.

Предмет дослідження – моделі та методи комбінаторно-оптимізаційного проектування технологічних систем механічної обробки.

Методи дослідження: об'єктно-орієнтоване моделювання предметної області на базі мови UML для розробки інформаційних моделей машинобудівних деталей та технологічної системи на рівні операції, діаграм класів для програмного забезпечення; абстрактна алгебра, теорія множин, теорія графів та математична логіка для розробки математичних моделей структурних елементів технологічної системи, які є основою еволюційних методів, що запропоновані в даному дослідженні; генетичні алгоритми та штучні нейронні мережі для розробки еволюційних методів.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті дослідження дістав подальшого розвитку підхід до структурно-параметричного синтезу технологічних систем механічної обробки за рахунок застосування еволюційних ме-

тодів проектування для автоматизації проектних робіт, при цьому отримане наступне:

а) вперше запропонований еволюційний метод проектування структури технологічних систем механічної обробки, що, на відміну від існуючих, вирішує задачі вибору найбільш раціональної конфігурації технологічної системи за мінімумом трудомісткості комплексно, з огляду як на маршрут обробки всієї деталі, так і маршрути обробки елементарних поверхонь. З одного боку, такий підхід дозволяє вибрати конфігурацію технологічної системи більш ефективно з погляду на використання виробничих ресурсів механооброблювального цеху. З іншого боку, орієнтованість методу на автоматизацію проектних робіт при технологічній підготовці виробництва з використанням генетичного алгоритму дозволяє знизити їхню трудомісткість;

б) вперше запропонований еволюційний метод дворівневого вибору раціонального сполучення засобів технологічного оснащення, що, на відміну від існуючих, вирішує завдання вибору засобів технологічного оснащення і їхніх параметрів у комплексі, на основі математичної моделі багаторівневого програмування. Це дозволяє одержати проектні рішення на рівні технологічної операції, які забезпечують найбільш повне використання можливостей засобів технологічного оснащення у виробництві. Математичні моделі, що становлять основу методу, дозволяють використовувати інваріантне програмне забезпечення, яке реалізує генетичний алгоритм та інтегрується у вигляді СОМ-об'єктів, що знижує рівень помилок при автоматизації проектування;

в) вперше запропонований еволюційний метод проектування технологічних і складальних розмірних ланцюгів, що за рахунок використання гібридного генетичного алгоритму та нейроподібних структур, дозволяє підібрати допуски складових ланок, які забезпечують найбільш повне використання допуску замикаючої ланки. На відміну від існуючих цей метод комплексно вирішує задачі розрахунку зв'язаних розмірних ланцюгів за рахунок використання нейроподібних структур, що знижує кількість помилок і трудомісткість проектування на цьому етапі;

г) на основі запропонованих у даній роботі математичних моделей, одержав подальший розвиток метод кількісної оцінки правильності проставлення розмірів на машинобудівних деталях. Цей метод на відміну від існуючих дозволяє:

- зняти суб'єктивний фактор при технічному контролі креслень, що підвищує їхню якість;
- відмовитися від розробки експертних систем, за рахунок використання теоретично обґрунтованих аналітичних залежностей, що спрощує автоматизацію цього етапу технологічної підготовки виробництва та знижує її трудомісткість.

Практичне значення отриманих результатів. Еволюційні методи проектування, реалізовані на рівні програмного забезпечення:

- обчислювальне ядро параметричної оптимізації технологічної системи, яке виконано у вигляді СОМ об'єкта;
- обчислювальне ядро технологічного проектування, виконаного у вигляді-

ді бібліотеки класів технологічного проектування;

- модулі розрахунку розмірних ланцюгів, інтегровані із системою SolidWorks;

- незалежний модуль розрахунку розмірних ланцюгів, що зв'язується з різними CAD системами за допомогою бібліотеки XSLT сценаріїв.

Сукупність розроблених модулів забезпечує єдину методологічну основу для створення інструментальних засобів автоматизації проектування технологічних систем механічної обробки.

Зазначене програмне забезпечення використовувалося на різних етапах ТПВ публічного акціонерного товариства «Харківський тракторний завод» (м. Харків) та в конструкторській підготовці товариства з обмеженою відповідальністю Українське конструкторсько-технологічне бюро підшипникової промисловості (м. Харків), що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи виконані безпосередньо автором та опубліковані в роботах [1 – 32]. У друкованих наукових працях, опублікованих у співавторстві, авторові належить: в [1] алгоритм побудови моделі деталі з урахуванням ієрархічних зв'язків та інформаційні моделі призматичних деталей і тіл обертання в XML; в [2] розробка мережі фреймів «Діалог» і алгоритмів інтеграції додатків на основі OLE; в [3] розробка схеми інформаційних потоків при застосуванні верстатів з ЧПК, інформаційна модель технологічного фрейму мовою XML, розробка мережі фреймів для обробки отворів і формування керуючої програми; в [4] розробка продукційних правил формування технологічного процесу для корпусних деталей на багатоцільових верстатах з ЧПК; в [5] аналіз алгоритмів побудови твердотільних моделей у конструкторських САПР, класифікація елементів форми деталі, математична модель деталі; в [6] узагальнений сценарій обробки тіл обертання, конструкторський граф деталі, технологічний граф деталі, взаємозв'язок графів; в [8] математична модель формального нейрона для розмірного ланцюга, математична модель навчання нейрона, алгоритм розрахунку розмірних ланцюгів; в [9] математична модель формування маршруту обробки на основі коефіцієнтів уточнення, аналіз коефіцієнтів уточнення для різних сполучень допусків; в [13] математична модель параметричної оптимізації технологічної системи та аналіз особливостей параметричної оптимізації дискретних технологічних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи докладались на конференціях: 5-та міжнародна науково-практична конференція «Vědecký průmysl evropského kontinentu – 2009» (м. Прага) ; 6-та міжнародна науково-практична конференція «Efektivní nástroje moderních věd – 2010» (м. Прага); 6-та міжнародна науково-практична конференція «Vědecký pokrok na roumeyí tisíciletí – 2010» (м. Прага); 6-та міжнародна науково-практична конференція «Naukowa przestrzecz Europy – 2010» (м. Прземісл); 6-та міжнародна науково-практична конференція «Основни проблеми на съвременната наука – 2010» (м. Софія); 6-та міжнародна науково-практична конференція «Новини за модерна наука – 2010» (м. Софія); 6-та міжнародна науково-практична конференція «Найновите постижения на европейската наука – 2010» (м. Софія); 16-та міжнародна науково-практична конференція «Физические и компьютерные те-

хнології» 2010 г. (м. Харків); XVIII міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MICROCAD-2010 (м. Харків); міжнародна науково-практична конференція «Інтерпартнер – 2010» (м. Харків).

Публікації. Основні положення викладені у 32 статтях. Зокрема 24 статі у виданнях, атестованих для публікацій результатів дисертаційних робіт.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків. Загальний об'єм дисертації нараховує 415 сторінок, із них рисунків на окремих сторінках – 29, таблиць – 10, список використаних джерел із 232 найменувань на 31 сторінці, 12 додатків на 99 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності теми роботи, сформульовану мету роботи та перелік задач, розв'язуваних для її досягнення, визначення наукової новизни та практичної цінності роботи.

Перший розділ роботи присвячений аналізу проблеми автоматизації проектування технологічних систем механічної обробки. Розробкою теоретичних основ методів автоматизованого проектування технологічних процесів, що забезпечують оптимізацію параметрів і структури технологічної системи займалися Р.А. Аллік, В.И. Аверченков, Г.К. Горанський, А.П. Гавриш, Н.М. Капустін, С.П. Митрофанов, А.И. Петренко, О.И. Семенов, Ю.М. Соломенцев, В.Д. Цветков, Б.Е. Челищев та ін. Аналіз сучасного стану проблеми показав, що в реальному виробництві проектування технологічного процесу прив'язано безпосередньо до наявності засобів виробництва в цеху або на ділянці. При класичному підході проектування починається з визначення елементарних маршрутів, для кожної поверхні на деталі, а потім виконується компонування цих маршрутів у єдиний технологічний процес. Задача складна та багатоваріантна, а також досить складно формалізується, оскільки існує множина методів для обробки однієї поверхні, що вирішують задачу з різною долею ефективності.

Ефективна виробнича система, формується на основі розв'язання задач оптимізації великої розмірності. Задача вибору раціональних методів оптимізації для проектування конкретних структурних елементів технологічної системи викликає певні складності, тому що існує велика кількість методів оптимізації, що застосовуються з тим або іншим ступенем ефективності для розв'язання різних інженерних задач. Порівняння цих методів між собою на практиці викликає значні труднощі через велику трудомісткість їхньої реалізації для складних технічних систем і в більшості випадків відсутності об'єктивних критеріїв порівняння.

При технологічному проектуванні спостерігається таке:

1. Широкий розкид цільових функцій за ступенем нелінійності та топологічних властивостей при проектуванні різних структурних елементів технологічної системи;

2. Велика кількість незалежних змінних у математичних моделях елементів технологічної системи;

3. Мають перевагу цільові функції із великою кількістю екстремумів;

4. Складності з аналітичним визначенням похідної для більшості задач оптимізації;

5. Наявність дискретних і безперервних цільових функцій у межах однієї технологічної системи. На рівні проектування всієї технологічної системи переважають дискретні функції, оскільки технологічна система механічної обробки, реалізована на сучасних підприємствах по своїй суті дискретна. На рівні процесів частіше розглядаються безперервні цільові функції;

6. На рівні технологічної системи виникають значні труднощі з аналітичним описом цільової функції, що обумовлено складністю взаємозв'язків між структурними елементами технологічної системи;

7. Велика різноманітність обмежень, обумовлених властивостями технологічної системи. Тут спостерігаються всі типи обмежень, розповсюджені в теорії оптимізації.

З урахуванням даних особливостей сформульована мета дисертації та визначені задачі, розв'язання яких забезпечує її досягнення.

Основні результати розділу опубліковані в [1, 2, 3, 14, 24].

Другий розділ присвячений розробці концептуальної моделі ГА, що є основою еволюційних методів, що використовується у технологічному проектуванні. Тут виконується аналіз ефективних напрямків застосування ГА при автоматизованому проектуванні технологічних систем, на основі якого пропонується концептуальна модель ГА.

Використання ГА при проектуванні дискретних технологічних систем представляє послідовний розгляд еволюції системи, що оцінюється функцією пристосованості системи до зовнішнього виробничого середовища. Причому, вид і характер функції досить складно визначити. Якщо враховувати, що параметри структурних елементів змінюються дискретно, то виникає задача пошуку оптимальної конфігурації технологічної системи в умовах великої розмірності й невизначеності. Практичне застосування ГА показує, що він успішно розв'язує такі задачі в силу своєї дискретності та стохастичності, а його використання дозволяє одержати розв'язки досить близькі до оптимального. Структура технологічної системи в цьому випадку фіксується на рівні хромосоми, де генами є параметри структурних елементів, а ефективність конкретної конфігурації системи оцінюється ступенем її пристосованості до випуску заданої продукції, за умовою, які обмежують зміни цих параметрів. Тоді в процесі проектування виникає множина станів, обумовлених хромосомами, з яких відбираються найбільш перспективні по функції пристосованості.

Формальна постановка задачі виглядає так:

1. Вихідна множина для формування хромосоми $B = \{0,1\}$;

2. Хромосома по своїй структурі визначається

$$H_j = \{(a_1, \dots, a_n) : (\forall i \in I, I = \overline{1, n})(a_i \in B)\}, j \in J, J = \overline{1, 2^n}, H_j \in B^n, Y \subseteq R^+, \quad (1)$$

де H_j – хромосома; a – алелі, які складають хромосому; n – кількість параметрів що оцінюються.

3. Функція фітнесу подається, як відображення

$$fit : B^n \rightarrow Y, \quad (2)$$

де Y – множина значень функції фітнесу;

4. Пошук найкращої хромосоми буде

$$y^* = \underset{y \in Y}{opt} \{y\}, Y = \left\{ y : \left(y_i = fit(H_j) \right) \wedge \left(\bigwedge_{k=1}^s A(H_j)_k = 1 \right) \right\}, \quad (3)$$

де y^* – оптимальне значення функції фітнесу; y – поточне значення функції фітнесу; $A(H_j)_k$ – предикатна формула, що обумовлює існування хромосоми; s – кількість усіх предикатних формул для визначення існування хромосоми.

У даній роботі пропонується модель ГА (див. рис. 1), що орієнтована на особливості предметної області та складність взаємозв'язків між елементами системи при пошуку оптимального рішення. Ці особливості враховані при застосуванні операторів схрещування, мутації та відбору. Процес відбору особин заснований на модифікованій ранговій селекції, де для схрещування та мутації відбираються особини за номером (рангу) у поточній популяції: чим вище ранг, тим вище ймовірність відбору.

Процес відбору розбитий на два етапи початковий і кінцевий, границя яких задається виходячи з особливостей конкретної задачі у відсотках від загальної кількості еволюцій. Наявність двох етапів дозволяє одержати досить гнучкий інструмент для пошуку оптимуму. Кожний етап має свої оператори відбору особин.

Основні результати розділу опубліковані в [9, 13, 24, 28].

Третій розділ присвячений розробці еволюційного методу структурного синтезу технологічних систем механічної обробки. В основі методу лежить математична модель структури технологічної системи (див. рис. 2). Модель (рис. 2) має сім рівнів ($m = 7$): ТП – рівень технологічного процесу, де спостерігається повна впорядкованість технологічних операцій; ОБ – рівень технологічної операції, де, найчастіше, спостерігається частковий порядок; ПОО – рівень положення об'єкта обробки, який можна асоціювати з позицією обробки; ПОУ – рівень положення обробляючого пристрою, це може бути револьверна головка і т.п.; БИ – рівень блоку інструментів, де розглядається можливість об'єднання інструментів; И – рівень інструментів; П – рівень методів обробки поверхонь.

Математична модель графа структури технологічної системи буде

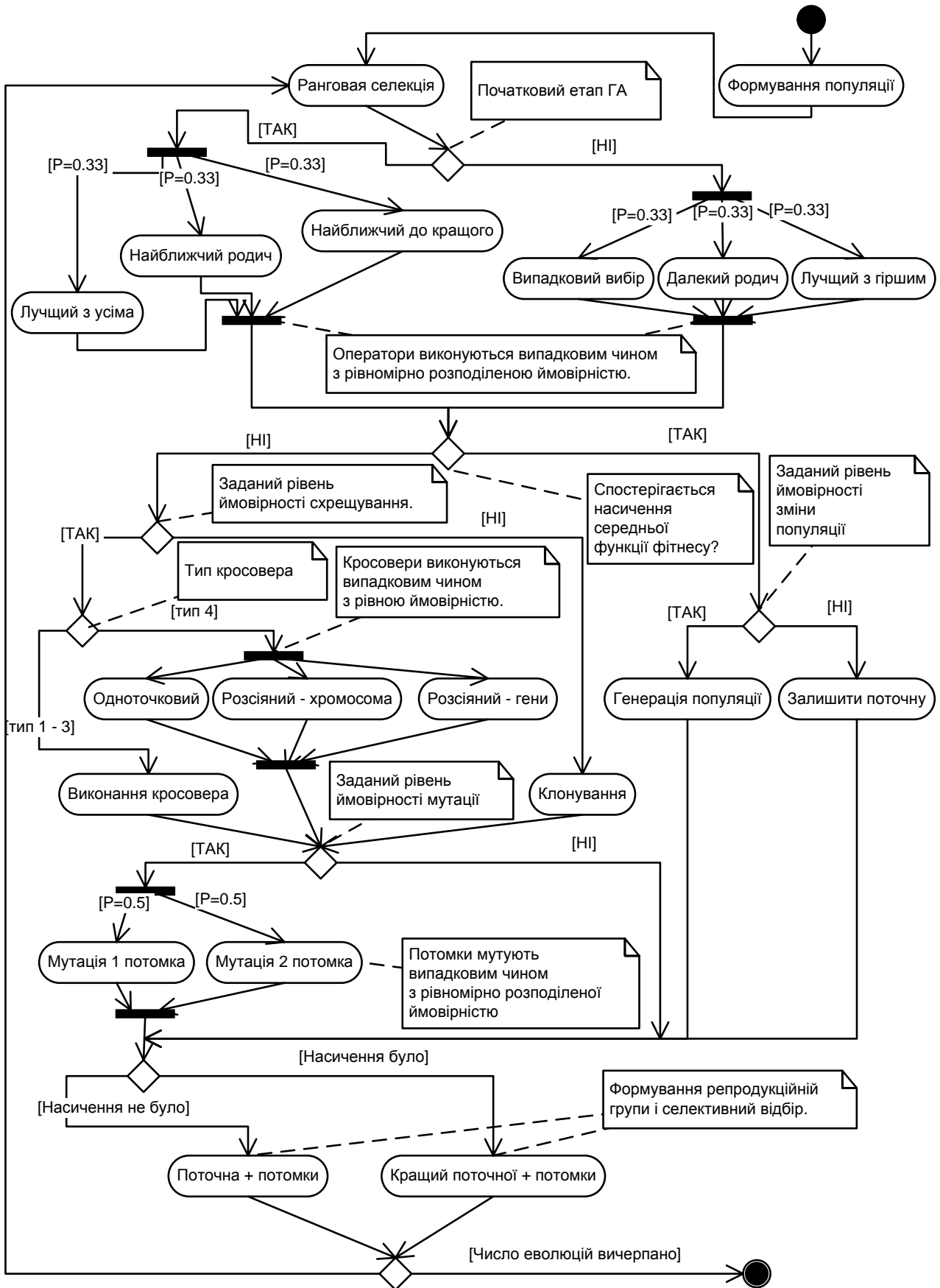


Рисунок 1 – Схема модифікованого генетичного алгоритму

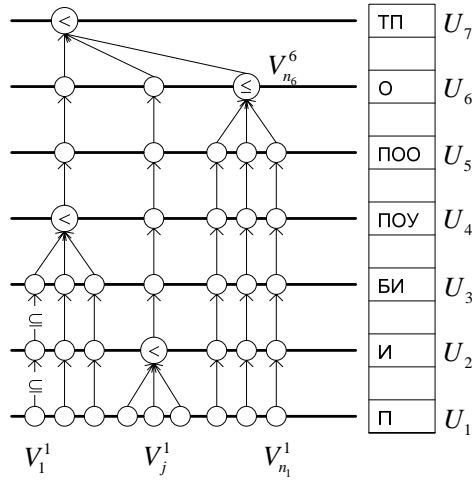


Рисунок 2 – Математична модель технологічної структури

$$V_j^i \subseteq U_i, j \in J, J = \overline{1 \dots n_i}, n_i \in N, N = \{n_i : n_i = |U_i|, i \in I, I = \overline{1 \dots m}\}. \quad (4)$$

Властивості моделі (4) такі:

$$|U_i| > |U_{i+1}|, i = \overline{1 \dots m-1}; \quad (5)$$

$$|V_j^1| = 1, j = \overline{1 \dots n_1}; \quad (6)$$

$$|U_m| = 1; \quad (7)$$

$$|V_1^m| = |U_m|. \quad (8)$$

На кожній множині U_i задана розбивка, така що

$$V_j^i \neq 0, j \in J, J = \overline{1 \dots n_i}, n_i \in N, N = \{n_i : n_i = |U_i|, i \in I, I = \overline{1 \dots m}\}, \quad (9)$$

$$\bigcup_{j \in J} V_j^i = U_i, i \in I, I = \overline{1 \dots m}, \bigcap_{j \in J} V_j^i = 0;$$

$$(V_j^i, <) XOR (V_j^i, =); \quad (10)$$

$$(U_{m-1}, <), (U_k, \leq), k \in K, K = \overline{1 \dots m-2}. \quad (11)$$

Математична модель (4) дозволяє визначити наявність ізоморфізму між структурними моделями технологічної системи, що буде означати наявність властивості гомоморфного відображення між даними технологічними системами. Це дозволяє виділити типові елементи проектування, що знижують розмірність задачі. Технологічні процеси, що мають ізоморфізм структур, можуть бути подані одним фреймом у базі даних технологічного проектування.

На основі даної моделі розробляється модель технологічної системи у вигляді нейроподібної мережі (НпМ). Модель технологічної системи у вигляді НпМ має 6 шарів нейроподібних елементів (НпЕ) різного виду, з яких 4 шари сховані і визначають структуру системи. Вихідний шар містить один НпЕ з одним аксоном, а кількість входів залежить від кількості операцій технологічного

процесу. Кількість НпЕ вхідного шару визначається потужністю множини методів обробки пов'язаних з поверхнями деталі. У вихідному стані кількість НпЕ схованих шарів їх зв'язки та синаптичні ваги не відомі (рис. 3).

Таким чином, постановка задачі для еволюційного проектування така.

Дано:

- математична модель технологічної структури у вигляді графа-дерева;
- математична модель технологічної структури у вигляді НпМ (рис. 3);
- скінченна множина методів технологічного впливу для конкретної деталі;
- скінченна множина засобів технологічного оснащення.

Знайти технологічну структуру, що забезпечує мінімальну сумарну трудомісткість обробки всієї деталі.

При розв'язанні задачі *необхідно враховувати*, що:

- вміст множини методів технологічного впливу обумовлюється двома факторами: перший – геометричні параметри деталі; другий – наявність конкретних засобів технологічного оснащення, що використовуються у цеху або на ділянці;

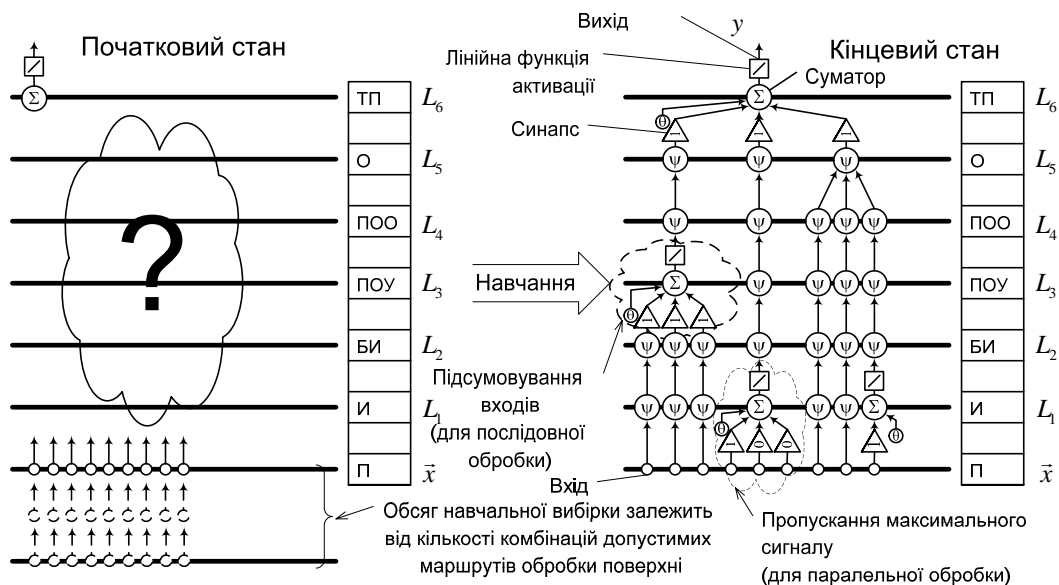


Рисунок 3 – Схема навчання НпМ

– при рішенні задачі формування технологічної структури раціональної в смислі мінімуму сумарної трудомісткості необхідно виконати вибір маршрутів обробки на рівні деталі за умови раціональності маршрутів обробки окремих поверхонь;

– при формуванні технологічної структури потрібно враховувати ієрархічні взаємозв'язки між конструктивними елементами (КЕ), із яких складається деталь, та які впливають на послідовність обробки.

Розв'язання задачі:

1. На кожному рівні глибини дерева (рис. 2) застосовується розбивка множини на підмножини за допомогою двох відношень порядку та еквівалентності

$$\{\rightarrow, \leftrightarrow\} \equiv \{\leftarrow, \sim\}. \quad (12)$$

Отримані підмножини не перетинаються (9). Використання того або іншого відношення для пари елементів поточного рівня продиктовано технологічними міркуваннями. У результаті, маємо множину упорядкованих пар (x_i, x_j) і не впорядкованих $\{x_i, x_j\}$ пар елементів технологічної структури;

2. Підмножини, на яких заданий частковий порядок, мають лінійний порядок, оскільки будь-які два елементи із цієї множини порівнянні. Звичайно такі підмножини називають ланцюгом;

3. Технологічна структура це позначене орієнтоване дерево з коренем. На різних рівнях глибини дерева формуються ущільненні та не ущільненні ланцюги. Кожний елемент технологічної структури подається моделлю (рис. 4);

4. У результаті, маємо формулу (13) структури ТП – f , що представляється деревом (рис. 2)

$$f_2(x_3, \dots, x_{17}) = \{\{x_3 \varphi_2 x_4\} \varphi_2 \{x_5\}\} \varphi_1 \{x_6 \varphi_2 x_7\} \varphi_1 \{x_8 \varphi_2 x_9\} \varphi_1 \varphi_1 \{x_{10} \varphi_2 x_{11}\} \varphi_1 \{x_{12} \varphi_2 x_{13}\} \varphi_1 \{x_{14} \varphi_2 x_{15}\} \varphi_1 \{x_{16} \varphi_2 x_{17}\}; \quad (13)$$

5. Суть проектування структури ТП, у цьому випадку, полягає в одержанні на першому рівні графа дерева не ущільненого ланцюга;

6. Над базисом B при фіксованій кількості методів може бути реалізована множина формул F .

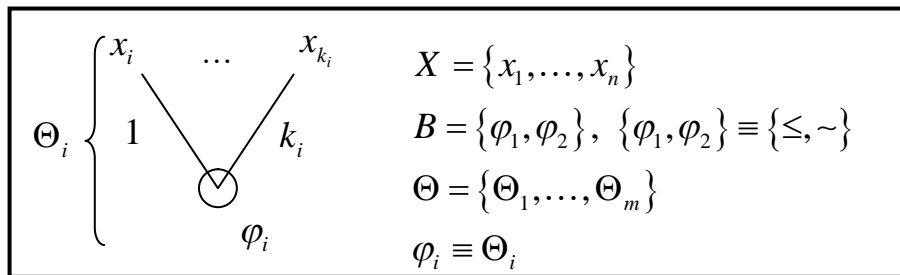


Рисунок 4 – Основний елемент структури ТП:

X – множина структурних елементів нижчого рівня, які виділяються в підмножину, на якій встановлено одне з базисних відношень. До елементів нижчого рівня можуть бути віднесені як методи обробки, так і різні структурні елементи ТП; B – базис, що складається з множини бінарних відношень; φ_i – тип відношення, встановленого на виділеній підмножині структурних елементів ТП; Θ – множина структурних елементів ТП.

Кожній формулі f ставимо у відповідність значення критерію оцінки якості проектування структури ТП – k

$$\beta: F \rightarrow K; F = \{f_i, i \in [1, n]: f(x_1, \dots, x_g) \in B, g = |X|\};$$

$$K = \{k_i, i \in [1, m]\}, |F| = |K|. \quad (14)$$

6. Процес проектування структури ТП є розв'язання комбінаторно-оптимізаційної задачі виду

$$f^* = \min_{\forall f \in F} \{k\}, K = \left\{k: \bigwedge_{j=1}^s A_j(f) = 1\right\}, \quad (15)$$

де $A_j(f)$ – обмеження на структуру ТП у вигляді предиката, що описує умови, яким повинна задовольняти структура проектованого ТП. Причому, для даної структури всі предикатні формули повинні мати значення «ІСТИНА». На цій основі формується множина оцінок структури, з якої по мінімуму критерію визначається оптимальна формула структури. Множина значень оцінки k може бути сформована залежно від обраного критерію ефективності технологічної системи. У нашому випадку це сумарна трудомісткість обробки деталі.

У нейромережевій постановці процес проектування ефективної технологічної системи виглядає, як формування НпМ прямого поширення без зворотних зв'язків. При такому підході процес комбінаторно-оптимізаційного проектування технологічної системи подається як процес формування архітектури НпМ і вибору синаптичних коефіцієнтів НпЕ, так щоб досягався мінімум сумарної трудомісткості обробки деталі.

Розмірність задачі у випадку реальних технологічних систем вище 10000 комбінацій, що відносить її до класу NP-складних. Для зниження розмірності використовуються типові розв'язки, виділені на основі властивості гомоморфізму технологічних систем і оформлені у вигляді фреймово-продукційних моделей знань.

Для методу еволюційного проектування визначаються основні поняття:

1. Популяція – це множина технологічних процесів, які можуть бути потенційно реалізовані у виробничому середовищі, для виготовлення однієї конкретної деталі;

2. Особина – окремий технологічний процес;

3. Функція пристосованості – критерій оцінки ефективності окремого технологічного процесу стосовно виробничого середовища. У нашому випадку, сумарна трудомісткість, визначена за допомогою НпМ;

4. Особина (технологічний процес) представляється хромосомою або набором хромосом, що характеризують різні властивості важливі для виробничого середовища;

5. Ген – атрибут, що описує стан структурного елемента технологічної системи. Таким чином, хромосома визначає положення цього елемента в просторі станів технологічної системи.

При еволюційному проектуванні розв'язувати задачу структурного синтезу технологічної системи потрібно на двох рівнях, де для кожного рівня (рис. 5)

повинна бути своя хромосома: хромосома першого рівня містить дані про методи обробки окремих поверхонь і сценарії обробки всієї деталі; хромосома другого рівня визначається відповідно до сценарію першого рівня та містить дані про технологічні фрейми.

Суть методу еволюційного проектування, у цьому випадку, полягає у формуванні популяції та вибору з неї найбільш ефективної особини, шляхом застосування операторів генетичного алгоритму:

1. На першому рівні генерується випадковим способом генеральна сукупність методів обробки конструктивних елементів у вигляді підмножин маршрутів і набір правил, що визначають як на вихідній множині методів встановлювати частковий порядок;

2. На другому рівні по сценарію обробки формується хромосома, де, як гени виступають елементи рівня ПОО. Для позицій існують набори фреймів структури, які при формуванні популяції випадковим способом співвідносяться з генами хромосоми;

3. Проектування на другому рівні полягає в підборі фреймів для кожної позиції таким чином, щоб забезпечити оптимум функції пристосованості, що розраховується за допомогою НпМ.

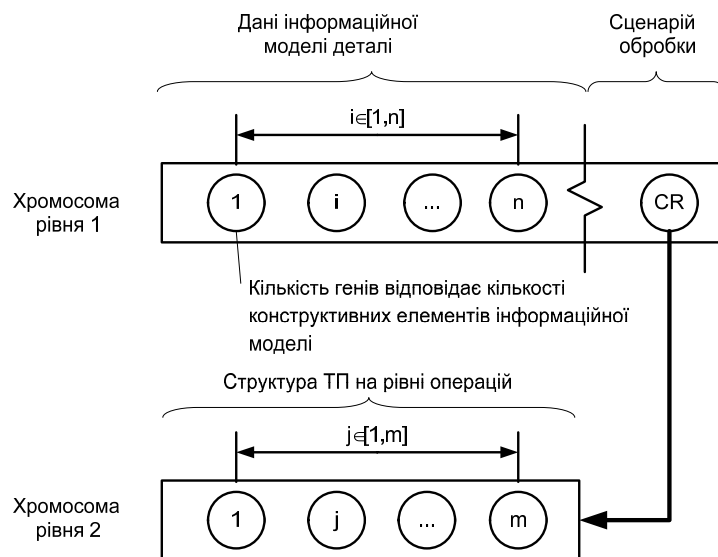


Рисунок 5 – Структура хромосом

Кожний фрейм фіксує певну структуру, на основі якої виконується виділення підмножин і часткове упорядкування вихідної множини. Основна задача цього рівня сформулювати ТП раціональний для вихідної множини методів, яка сформована на першому рівні, за заданими критеріями оцінки;

4. На першому рівні використовується аналогічна функція фітнесу, але вже для відбору оптимальних вихідних множин. Тоді, на першому рівні маємо популяцію хромосом, де кожна хромосома визначає вихідну множину методів, сценарій обробки та оптимальний технологічний процес для цього сполучення. Оптимальне проектування, у цьому випадку, полягає у виборі кращої хромосоми в сенсі функції пристосованості.

Таким чином, еволюційний метод проектування структури технологічних

систем механічної обробки містить у собі три аспекти.

Проблемний аспект – вибрати найкраще сполучення методів технологічного впливу та засобів технологічного оснащення, упорядковане в часі за мінімумом сумарної трудомісткості обробки.

Онтологічний аспект – множина методів технологічного впливу визначається з одного боку геометричними параметрами деталі, а з іншого можливостями конкретного виробництва. Розв'язання задачі проектування технологічної структури залежить від геометричних параметрів конструктивних елементів деталі та взаємозв'язків між конструктивними елементами в рамках деталі. Перше визначає упорядкований набір методів для окремого конструктивного елемента, а друге – технологічну структуру, тобто сполучення методів технологічного впливу для всіх конструктивних елементів, упорядковане в часі. Методи технологічного впливу для різних конструктивних елементів можуть компонуватися в одну операцію, коли вони технологічно сумісні. Задача вибору NP-складна.

Процедурний аспект:

- 1) сформувати інформаційну модель оброблюваної деталі мовою XML, що враховує багаторівневі зв'язки конструктивних елементів і розмірні зв'язки;
- 2) визначити правила валідності технологічних структур;
- 3) сформувати множини методів обробки та засобів технологічного оснащення з огляду на умови конкретного виробництва;
- 4) сформувати хромосоми першого та другого рівнів проектування;
- 5) задати умови особин, які будуть виживати в популяції, для першого та другого рівнів проектування у вигляді набору предикатних правил;
- 6) використати ГА для багаторівневої оптимізації. Тут вибір найкращого сполучення методів і їхніх параметрів подається, як навчання НпМ прямого поширення, що складається із НпЕ. Під навчанням розуміється вибір архітектури мережі та синаптичних ваг окремих НпЕ. Оцінка якості проектування НпМ проводиться за показником сумарної трудомісткості механічної обробки – чим менше трудомісткість, тим краще навчена мережа.

Основні результати розділу опубліковані в [6, 11, 14, 17, 19, 23, 27].

Четвертий розділ присвячений розробці еволюційного методу дворівневого вибору раціонального сполучення засобів технологічного оснащення. Задачі, для яких застосовується метод, у загальному виді формулюються нижче.

Дано:

– множина технологічного обладнання, кожний елемент цієї множини має параметри настроювання: частота обертання шпинделя, подача. Кожний параметр настроювання має множину значень, потужність якої визначається конструкцією металорізального обладнання та задається в паспорті верстата;

– множина інструментів, які припустимо використовувати з обраним обладнанням. Кожний інструмент цієї множини має параметри, що впливають на інтенсивність обробки, які, у свою чергу, мають множину припустимих значень;

– існуюча операційна технологія, де визначені конкретні методи технологічного впливу, використовувані на даній операції, та порядок їх у часі.

Знайти найбільш раціональне сполучення засобів технологічного осна-

щення (технологічного обладнання та металорізальних інструментів), які забезпечать оптимальне (мінімальне або максимальне) значення показника ефективності технологічної операції механічної обробки.

У даній роботі ці комбінаторно-оптимізаційні задачі пропонується розв'язувати за допомогою методу багаторівневого програмування. Задача верхнього рівня (ведучий елемент) – оптимізація вибору технологічного оснащення, з існуючих множин, за заданим критерієм ефективності. Задача нижнього рівня (ведений елемент) – оптимізація вибору режимних параметрів для фіксованих властивостей елементів технологічної системи.

Ведучий елемент впливає на реакції відомих елементів зміною параметрів технологічної операції. У веденого елемента залишаються повноваження, що дозволяють вирішувати, як підібрати оптимальне сполучення режимних параметрів для поточних елементів технологічної операції.

Формуємо узагальнену математичну модель (16) на основі аналізу концептуальної моделі технологічної операції, поданої на рис. 6.

Тут технологічна операція подається метакласом, якій наслідують властивості інших класів і метакласів. Метакласами є: метод обробки, об'єкт обробки, перехід. До класів належать матеріально існуючі структурні елементи технологічної операції: оброблювана поверхня; технологічні бази, що визначають положення оброблюваної поверхні в просторі; інструмент; верстат; пристрій.

$$\left\{ \begin{array}{l} f^* = \underset{\vec{x} \in \bar{X}}{\text{opt}} \{ f(\vec{x}, \vec{y}) \} \\ \bar{X} = \left\{ \vec{x}_i : (x_1, x_2, \dots, x_n), j = \overline{1, n}, (x_j \in Et_j) \wedge \left(\bigwedge_{k=1}^m (G_k(\vec{x}_i) \leq 0) = 1 \right) \right\} \\ Et_j = \{ et_i, i = \overline{1, s} : A(et_i) = 1 \}, f : \bar{X} \times \bar{Y} \rightarrow Ne_f \\ q^* = \underset{\vec{y} \in \bar{Y}}{\text{opt}} \{ q(\vec{x}, \vec{y}) \} \\ \bar{Y} = \left\{ \vec{y}_i : (y_1, y_2, \dots, y_n), j = \overline{1, n}, (y_j \in Pt_j) \wedge \left(\bigwedge_{k=1}^m (g_k(\vec{x}_i, \vec{y}_i) \leq 0) = 1 \right) \right\} \\ Pt_j = \{ pt_i, i = \overline{1, s} : R(pt_i) = 1 \}, q : \bar{X} \times \bar{Y} \rightarrow Ne_q \end{array} \right. , \quad (16)$$

де f^* – оптимальне значення цільової функції ведучого елемента; \bar{X} – множина векторів, що характеризують властивості, які змінюються у елементів технологічного оснащення; n – число незалежних змінних, що описують властивості елементів технологічного оснащення; x_j – змінна, що відображає конкретну властивість елемента технологічного оснащення; Et_j – опорна множина змінної x_j ; $G_k(\vec{x}_i)$ – технічні обмеження на цільову функцію; $A(et_i)$ – предикатна формула, що описує властивість, по котрій виділяються опорні множини для змінних.

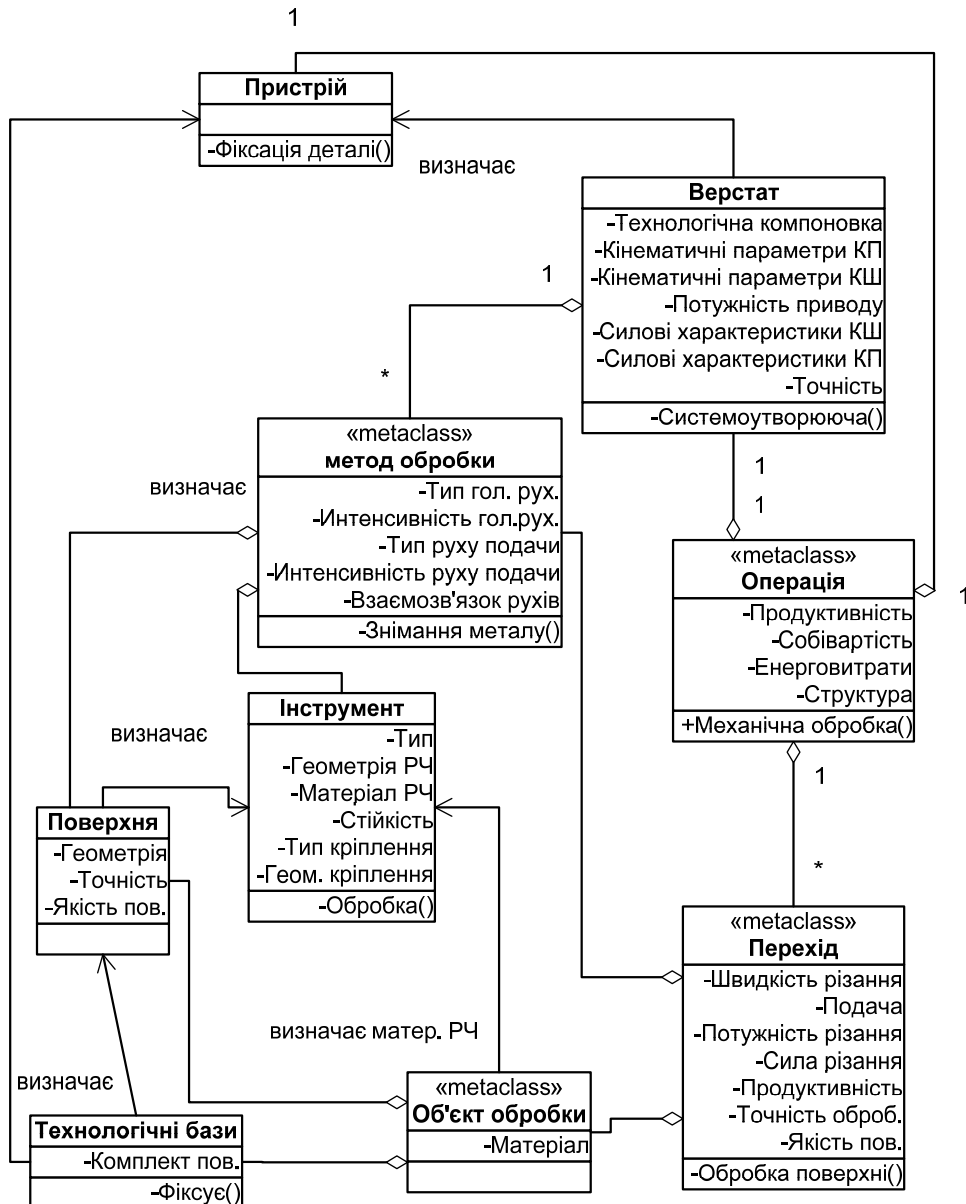


Рисунок 6 – Концептуальна модель технологічної операції

Наприклад, вираз «елемент є стійкість інструмента» виділяє множину значень стійкості, що відповідають конкретному інструменту; f – відображення, що ставить у відповідність множину сполучень властивостей технологічного оснащення та режимних параметрів $\vec{X} \times \vec{Y}$ множині значень критерію ефективності Ne_f ; q^* – оптимальне значення цільової функції відомого елемента; \vec{y} – вектор режимних параметрів; \vec{Y} – множина векторів режимних параметрів; y_j – елемент вектора режимних параметрів, що описує конкретне значення режимного параметра з опорної множини Pt_j ; $g_k(\vec{x}_i, \vec{y}_i)$ – технічні обмеження на функцію відомого елемента; q – відображення аналогічне f тільки для відомого елемента.

Розв'язання задачі раціонального вибору технологічного оснащення розглядається на прикладі фрезерної операції. Вибір раціонального сполучення параметрів технологічної системи виконується з 3-х верстатів, 146-ти фрез, 13-ти

матеріалів ріжучої частини, 7-и можливих періодів стійкості.

Для реалізації розрахунків на основі даної математичної моделі розроблені фреймово-продукційні моделі розрахунку режимних параметрів технологічних систем для операцій: свердління; розсвердлення; зенкерування; розгортання; нарізування різьби мітчиком, торцевого фрезерування, фрезерування кінцевими фрезами, точіння, розточування.

Таким чином, еволюційний метод дворівневого вибору раціонального сполучення засобів технологічного оснащення містить у собі три аспекти.

Проблемний аспект – визначити на рівні операції найвигідніше сполучення засобів технологічного оснащення і їхніх параметрів за заданим критерієм ефективності.

Онтологічний аспект – при розв’язанні даної задачі необхідно врахувати наступне: кожний клас «структурний елемент технологічної системи» має кінцеву множину реалізацій, розмір якої визначається конкретною виробничою ситуацією; структура технологічної системи залишається незмінною; кожний об’єкт класу має набір дискретних параметрів, у яких є свої множини значень, таким чином, при обраному об’єкті залишається можливість варіювання його параметрами.

Процедурний аспект – реалізація методу виконується послідовним виконанням наступних операцій:

- подати математичну модель вибору найкращого сполучення засобів технологічного оснащення у вигляді дворівневого програмування, де перший рівень представляється вибором сполучення засобів технологічного оснащення з опорних множин, а другий рівень – вибором їхніх параметрів;

- визначити потужності опорних множин на кожному рівні, виходячи з конкретної виробничої ситуації, і сформувати фреймово-продукційну базу у вигляді електронних таблиць;

- визначити структуру хромосом першого та другого рівня за спеціальними правилами. Перша хромосома має гени, які подають коди засобів технологічного оснащення. Друга хромосома має гени, які подають коди значень припустимих параметрів конкретного об’єкта, визначеного в гені першої хромосоми;

- сформувати функції пристосованості для двох рівнів, для оцінки виживаності особин і припустимого набору критеріїв оцінки ефективності технологічної операції;

- визначити правила відсівання хромосом у вигляді технічних обмежень;
- застосувати ГА для вибору найкращого сполучення.

Основні результати розділу опубліковані в [7, 16, 22, 32].

П'ятий розділ присвячений розробці математичної та інформаційної моделі машинобудівних деталей для методів еволюційного проектування технологічних систем.

Математична модель деталі подається у вигляді орієнтованого графа. Він відображає семантичні відношення трьох типів між елементами машинобудівної деталі та розкладається на три графи. Граф відображає структуру моделі даної деталі безвідносно до розмірів елементів. Даний граф є прототипом фрейму

деталі. Відношення між елементами графа фіксують певну стереотипну ситуацію, а самі елементи графа є слотами фрейму. Кожен слот має опорну множину, потужність якої визначається типом елементів форми.

Подання деталі у вигляді орієнтованого графа дає можливість використовувати властивість ізоморфізму графів. Тоді кілька деталей, що мають ізоморфну структуру, замінюють одним фреймом деталі. Для виділення груп деталей, що мають подібні структурні властивості, можна використовувати штучні нейронні мережі Кохонена та Хеммінга.

Наприклад, для деталі ДП «завод ім. Малишева» поданої на рис. 7 цей підхід реалізується наступною схемою, яка зображена на рис. 8. Тут є присутнім: одна група сполучень, що утворить основний контур деталі із циліндрів; дві групи накладень, де на циліндри №1 і №3 накладаються КЕ; дві групи конгруентних відношень.

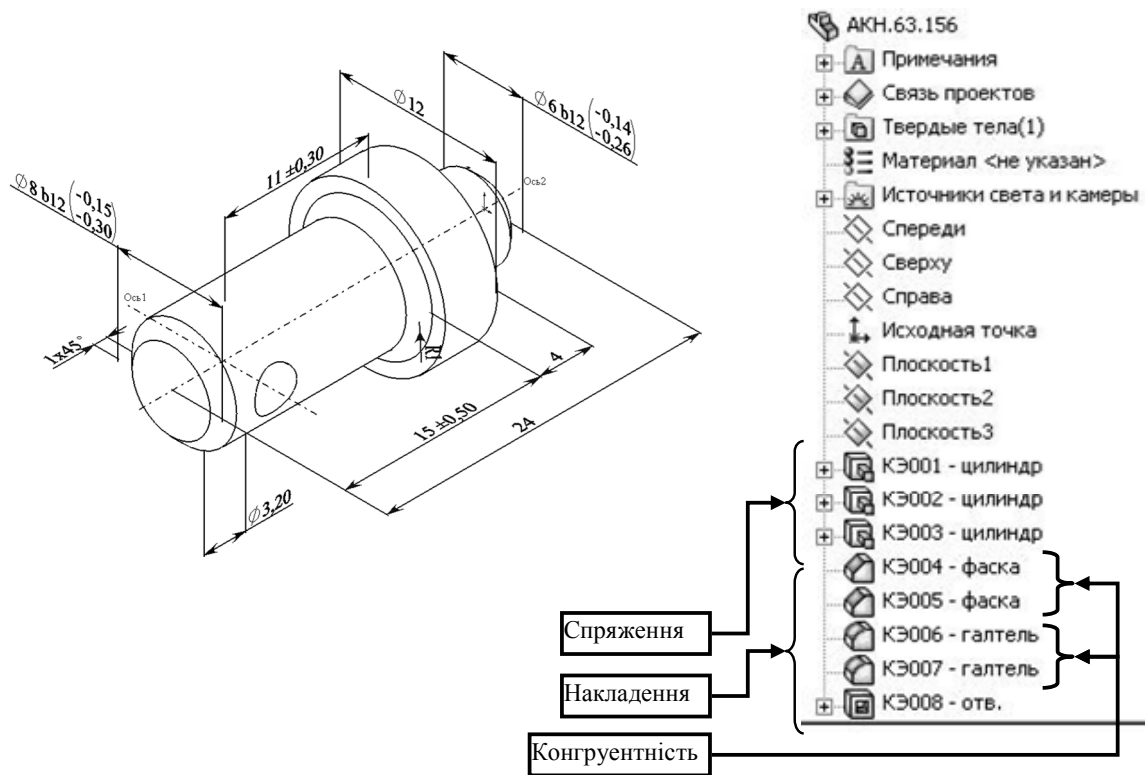


Рисунок 7 – Модель деталі «Вісь»

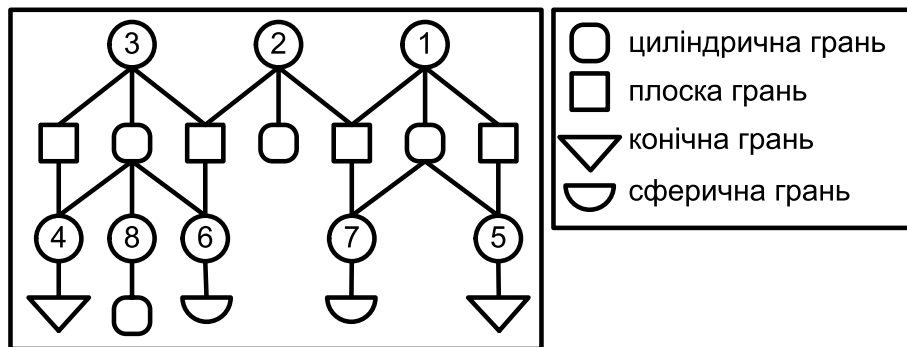


Рисунок 8 – Граф структурного складу деталі

Для використання розробленої математичної моделі в еволюційному про-

ектуванні створена її інформаційна модель, де в основу покладені концепції мови XML, оскільки теоретичні концепції цієї мови засновані на деревоподібному поданні інформації. Це дозволяє з одного боку уніфікувати моделі різних структурних елементів технологічної системи, а з другого забезпечує високу ефективність різних перетворень над ними за рахунок використання стандартизованих на рівні операційної системи програмних бібліотек.

Основні результати розділу опубліковані в [5, 6, 10, 15, 25, 26, 31].

Шостий розділ присвячений розробці еволюційних методів аналізу та розрахунку систем розмірів машинобудівних деталей. Запропоновано математичні моделі, які дозволяють аналізувати правильність проставляння розмірів на плоских контурах і на просторових моделях деталей.

Основним принципом формування плоских розмірних ланцюгів машинобудівних деталей є використання, поняття числа ступенів свободи механічної системи, що складається з фіксованої кількості точок із заданою кількістю голономних зв'язків. На плоскому контурі, що складається з n відрізків прямих повинне бути наступна кількість параметрів: система параметрів, що визначає форму конструктивних елементів – $(n - 2)$ параметрів (голономні зв'язки); система параметрів, яка визначає розміщення конструктивних елементів – $s = 2n - (n - 2)$. Тоді загальна система розмірів повинна мати $2n$ параметрів.

Структура взаємозв'язків між елементами контуру може бути зображена графом, що подає внутрішню стійку структуру взаємозв'язків, характерну для всіх варіантів завдання розмірів контуру. Аналітично задана модель графа має властивості груп обертань і симетрій, що дозволяє використати властивість ізоморфізму графів для аналізу правильності проставляння розмірів на кресленнях деталей і розробці методу кількісного аналізу правильності проставляння розмірів.

Формування просторових розмірних ланцюгів засновано на аналізі рухів твердого тіла, математичною моделлю якого є твердий трикутник, і двох діаграмах класів. Перша діаграма описує групування конструктивних елементів залежно від їхнього функціонального призначення. Друга визначає класи варіантів взаємодії залежно від положення елементів у просторі, що дозволяє класифікувати зв'язки, що накладаються на ці елементи по сполученню рухів. З урахуванням цих положень виведена формула (17), що дозволяє кількісно оцінити правильність проставляння розмірів:

$$P = 9 \cdot T - j, \quad (17)$$

де T – кількість КЕ, з яких складається деталь; j – кількість зв'язків.

Кількість зв'язків визначається з урахуванням, що базовий конструктивний елемент повністю нерухомий

$$j = 3 \cdot T + \sum_{i=2}^{T-1} V_i + \sum_{i=2}^{T-1} H_i + 6, \quad (18)$$

де V_i – явні зв'язки, обумовлені розмірами; H_i – неявні зв'язки, визначені на основі розробленої в даному дослідженні класифікації.

Еволюційний метод розрахунку розмірних ланцюгів за допомогою гібридного ГА включає три аспекти.

Проблемний аспект – забезпечити вибір найкращого сполучення допусків і відхилень складових ланок розмірного ланцюга, які забезпечать одержання граничних розмірів замикаючої ланки, що попадають у допуск.

Онтологічний аспект – необхідно врахувати наступне:

- особливості механічної обробки поверхонь, пов'язаних із цими ланками;
- вибір допусків і відхилень із множини припустимих відповідно до стандарту ISO;

- результати розрахунку повинні бути отримані при будь-якому сполученні вихідних даних з оцінкою наближення до допуску замикаючої ланки;

- вихідними даними для розрахунку є: допуск і відхилення замикаючої ланки; маршрут обробки поверхонь, зв'язаних ланками розмірного ланцюга; характеристики методів обробки по точності.

Процедурний аспект – для досягнення мети при заданих умовах потрібно виконати такі операції:

- формуємо математичну модель (19) розмірного ланцюга у вигляді НпМ прямого поширення без зворотних зв'язків з урахуванням підстановок (20) – (21):

$$y = f(g) = f\left(\sum_{i=1}^n W_i x_i + W_0\right), \quad (19)$$

де y – вихідний сигнал нейрона; $f(g)$ – функція активації; W_i – синаптичний коефіцієнт (синапс); x_i – вхідний сигнал; W_0 – початковий стан нейрона; n – кількість рецепторів.

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } t = 0 \\ 0, & \text{if } t < 0, \\ 0, & \text{if } t > 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$T_\Delta \leftrightarrow -W_0; T_i \leftrightarrow x_i; |\xi_i| \leftrightarrow W_i; m \leftrightarrow n, \quad (21)$$

де T_Δ – допуск замикаючої ланки; ξ_i – передаточне відношення складової ланки; T_i – допуск складової ланки; m – число ланок розмірного ланцюга.

Таким чином, на вхід нейрона подаються допуски складових ланок, а початковий стан нейрона визначається допуском замикаючої ланки. Нейрон буде активний у випадку розв'язання основного рівняння розмірних ланцюгів, тобто вихід дорівнює 1. В інших випадках він буде пасивним, тобто вихід дорівнює 0. При використанні лінійної функції активації будемо мати відхилення від допуску замикаючої ланки при розв'язанні проектної задачі розмірного ланцюга. Отже, функцію активації (20) можна використовувати при розв'язанні переві-

рочної задачі, а лінійну або квадратичну функції активації при розв'язанні проектної задачі;

- подаємо хромосому у вигляді входів НпМ, де гени – параметри окремих ланок ланцюга (рис. 9);
- визначаємо функцію фітнесу, як НпМ, що видає сумарну помилку підбору значень параметрів;
- формуємо умови існування хромосом з урахуванням онтологічного аспекту;
- здійснюємо вибір найкращих сполучень параметрів (допусків або відхилень) за допомогою ГА.

Основні результати розділу опубліковані в [8, 18, 21, 29, 30].

Сьомий розділ присвячений розробці програмного забезпечення еволюційних методів технологічного проектування. Для реалізації методу параметричної оптимізації технологічної системи механічної обробки, у даній роботі, пропонується використовувати обчислювальне ядро параметричної оптимізації технологічної системи (ВЯПОТС) (рис. 10).

Тут програма, що запускається, використовуючи дані файлу інформаційної моделі параметричної оптимізації (ИМПО), звертається до основної програми оптимізації (genalg), яка працює під управлінням системи MatLab2010, через ActiveX інтерфейс.

Основна програма провадить граматичний розбір файлу інформаційної моделі параметричної оптимізації (ИМПО), що містить параметри оптимізації, і викликає модуль, який реалізує модифікований генетичний алгоритм рангової селекції (texga). Даний модуль використовує моделі функції фітнесу (fitness) і технічних обмежень (limit), для роботи генетичного алгоритму. ВЯПОТС забезпечує 5 типів можливих моделей функції фітнесу та технічних обмежень, що дозволяє розширити область його використання з різними інструментальними засобами.

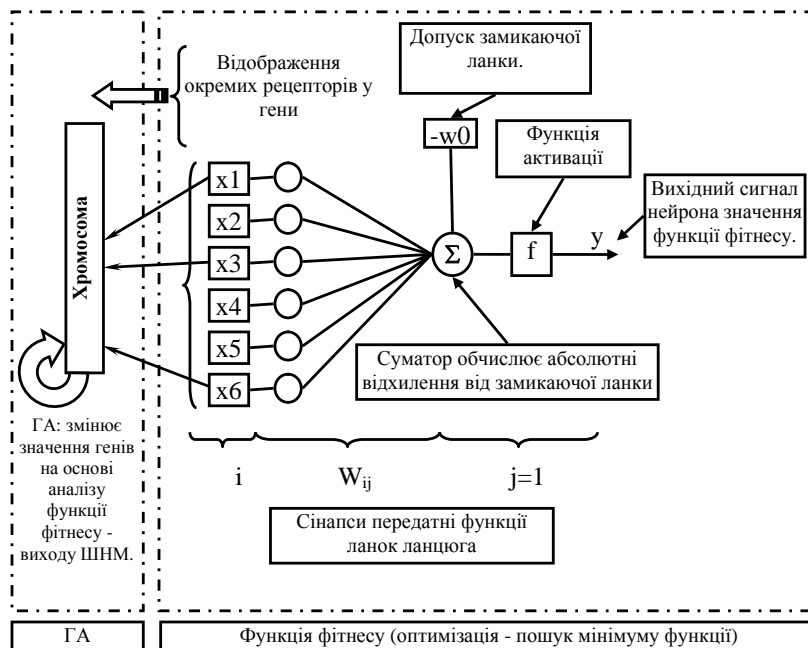


Рисунок 9 – Схема гібридного ГА для розв'язання проектної задачі

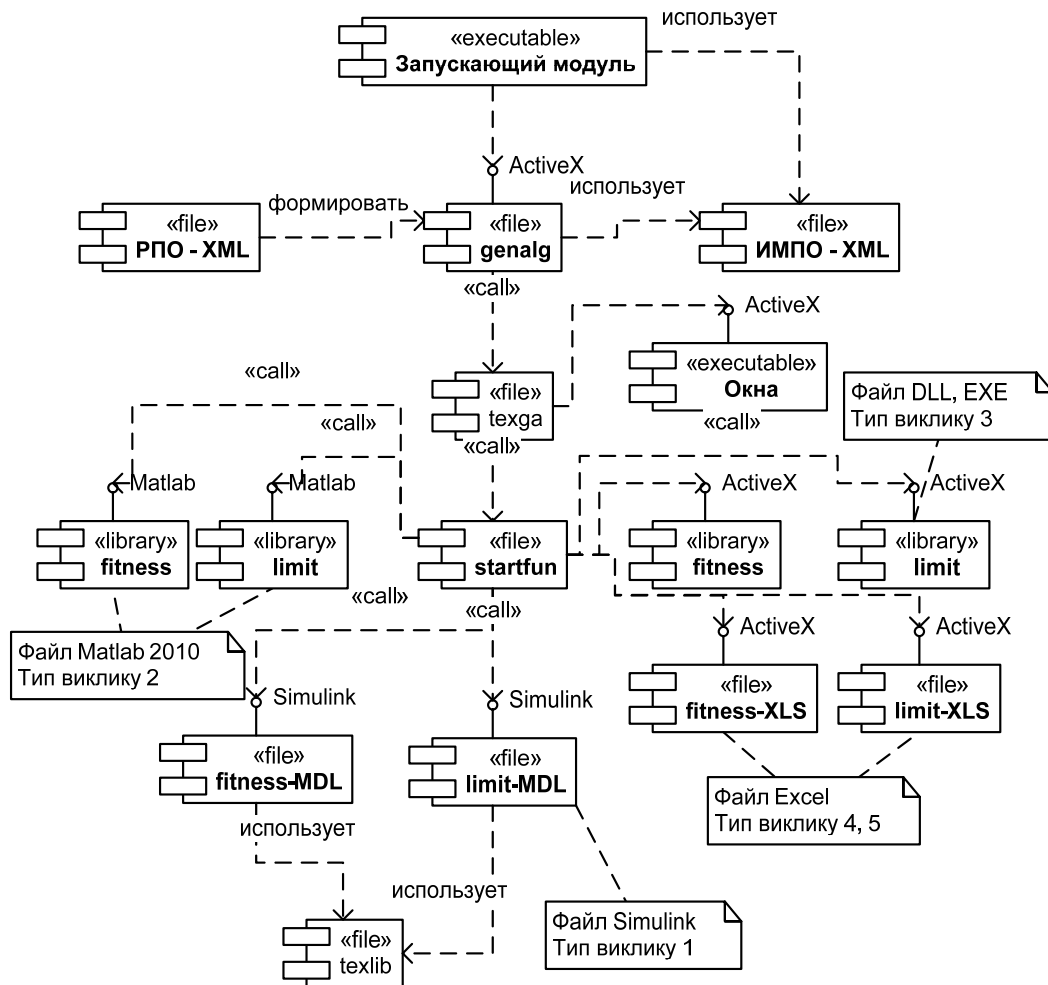


Рисунок 10 – Структура та інтерфейси ВЯПОТС

Для структурної оптимізації технологічної системи в роботі спроектоване обчислювальне ядро технологічного проектування (ВЯТП), що реалізовано у вигляді динамічної бібліотеки з інтерфейсом, який забезпечує доступ до методів ядра із зовнішнього додатка (рис. 11).

ВЯТП – засновано на використанні для розв'язання комбінаторно-оптимізаційних задач гібридних ГА, можливості яких розширюються застосуванням НпМ. Для роботи ВЯТП необхідно сформувати (XML - МД) інформаційну модель деталі за допомогою спеціальної програми, що забезпечує через API – інтерфейс зв'язок із САПР конструкторського призначення SolidWorks.

Потім формується файл вихідних даних моделювання (XML - ИД) і запускається розрахунок, результатом якого буде сформований технологічний процес у форматі XML (XML-ТП), використовуючи набір XSLT перетворень, з даного файлу формується технологічна документація.

Генетичні алгоритми реалізуються трьома основними класами: «Базовые методы»; «Математика»; «Адаптивные методы». Перший клас – містить незмінні методи реалізації генетичного алгоритму безвідносно до конкретної задачі. Другий – необхідний набір математичних методів, що забезпечують ефективну роботу алгоритму. Третій – набір методів, які залежать від особливостей розв'язуваного технологічної задачі, вони використовують пакет «Преобразования».

У додатках наведено: вихідний код ГА, приклади розрахунків за допомогою програмного забезпечення, акти використання результатів дисертаційної роботи на різних підприємствах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримане рішення актуальної науково-практичної проблеми, яке полягає в розробці єдиної методологічної основи для комбінаторно-оптимізаційного проектування в САПР технологічних систем механічної обробки з використанням принципів інтеграції та інваріантності. Це рішення ґрунтується на еволюційних методах, математичних та інформаційних моделях, особливості застосування яких розглянуті нижче.

1. Властивість гомоморфізму технологічної системи, є основним для будь-якої теорії уніфікації технологічних процесів. Виявлення цієї властивості на структурах припускає наявність математичної моделі структурних відношень між елементами технологічного процесу у вигляді генетичного дерева, що відображає процес спадкування властивостей елементів технологічної системи на різних рівнях. Загальний підхід до технологічного проектування, у цьому випадку, можна розглядати як послідовне застосування сортувань до вихідної множини методів обробки від рівня методів обробки до рівня операцій. Таким чином, математична модель технологічної структури це позначене орієнтоване дерево з коренем, де на різних рівнях глибини дерева формуються ущільнені та не ущільнені ланцюги. Тоді суть проектування структури ТП полягає в одержанні на першому рівні графа дерева не ущільненого ланцюга. Така модель може бути подана у вигляді НпМ прямого поширення із НпЕ спеціального виду. У результаті, ізоморфізм технологічних структур визначає наявність гомоморфізму технологічних процесів, що дозволяє знизити обсяги обчислень при пошуку раціональної технологічної структури за рахунок використання типових технологічних рішень. Подання технологічної структури у вигляді НпМ дозволяє досить просто оцінити сумарну трудомісткість виготовлення деталі в рамках усього технологічного процесу.

2. Метод еволюційного проектування структури технологічних систем механічної обробки забезпечує вибір найбільш раціональної структури технологічної системи з урахуванням особливостей конкретного виробництва за рахунок використання нейроподібних структур для моделювання технологічної системи та взаємозалежних інформаційних моделей, побудованих з урахуванням принципу інформаційної єдності. Зниження трудомісткості та витрат на виправлення помилок тут обумовлене тим, що раціональність маршруту обробки окремої поверхні визначається не ізольовано, а в комплексі з урахуванням раціональності маршруту обробки всієї деталі. Реалізація такого підходу стала можливою завдяки використанню нейроподібної моделі технологічної системи. Так само на підвищення якості рішень впливає використання в даній роботі моделі машинобудівної деталі, що дозволяє враховувати ієрархічні зв'язки між конструктивними елементами деталі, що впливають на формування технологічної структури.

Підвищення рівня автоматизації проектних робіт забезпечується реалізацією принципу інваріантності програмних рішень у САПР ТП, що використовує цей метод, за рахунок запропонованої в даній роботі об'єктно-орієнтованої бібліотеки класів, що є основою обчислювального ядра технологічного проектування.

3. Задача раціонального підбору параметрів структурних елементів технологічної системи в умовах багатомономенклатурного виробництва являє собою складну багаторівневу комбінаторно-оптимізаційну задачу. При цьому необхідно враховувати, що структура технологічної системи фіксована, тобто є фрейм технологічної операції, де слоти відображають структурні елементи технологічної системи з кінцевими опорними множинами. Потужність опорних множин слотів визначається можливостями виробничих підрозділів, тобто наявністю в цих підрозділах технологічного оснащення та устаткування. Кожне технологічне рішення, прийняте технологом у таких умовах, являє собою рішення з множини декартового добутку опорних множин слотів, причому зв'язки між слотами, зафіксовані на рівні фрейму, визначають можливість реалізації того або іншого рішення із цієї множини. Застосування для таких задач нового методу еволюційного вибору параметрів технологічної системи, заснованого на математичній моделі багаторівневого програмування, забезпечує зниження кількості помилкових проектних рішень і вибір найбільш раціонального сполучення параметрів структурних елементів технологічної системи. Це відбувається за рахунок комплексного дворівневого підходу до вибору елементів і їхніх параметрів за заданим критерієм оптимальності.

Принцип інваріантності реалізується в даному підході за рахунок застосування моделі ГА, оформленої у вигляді обчислювального ядра параметричної оптимізації, яке інтегрується в будь-яке обчислювальне середовище за рахунок технології СОМ.

Принцип інформаційної єдності реалізується за рахунок використання інформаційних моделей параметричної оптимізації виконаних мовою XML, що дозволяє підвищити рівень автоматизації проектних робіт і знизити трудомісткість програмної реалізації математичної моделі оптимізації в різних інструментальних середовищах.

Застосування ГА в даному методі дозволило реалізувати принципи паралельних обчислень, що значно знизило час обчислень і дозволило максимально використовувати обчислювальні можливості багатоядерних процесорів.

Використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для розрахунків режимних параметрів технологічної системи, дозволяє:

- реалізувати формування алгоритмічної моделі на основі функціонально незалежних модулів, що знижує рівень помилок моделювання при узгодженні етапів проектування;

- найбільш ефективно та просто набувати базу даних, що забезпечує розрахунок режимних параметрів, оскільки в умовах конкретного виробництва заміни підлягають тільки ШНМ, що акумулюють знання про властивості процесу різання. Причому навчання ШНМ може бути виконане прямо на виробництві з урахуванням конкретного устаткування та інструментальних матеріалів рі-

зних фірм.

4. Еволюційний метод розрахунку розмірних ланцюгів, заснований на використанні гібридного генетичного алгоритму, дозволяє підібрати найбільш раціональні сполучення полів допусків, які забезпечують підвищення якості складання виробів і виявлення резервів можливостей технологічної обробки. Практика показує, що найбільш ефективно використовувати даний метод на зв'язаних розмірних ланцюгах, де на вибір допусків і відхилень накладаються досить складні й часом суперечливі обмеження, пов'язані як з особливостями конструкції, так і з особливостями технології виготовлення. Гібридний генетичний алгоритм, застосовуваний у програмному забезпеченні, реалізує комплексний підхід до розрахунку розмірних ланцюгів, що дозволяє підібрати стандартні значення допусків і відхилень, що рекомендуються ISO, для більшості ланок розмірного ланцюга без трудомістких обчислень, які звичайно в цьому випадку виконують. Розрахунок розмірних ланцюгів з використанням нейроподібних мереж дозволяє досить ефективно автоматизувати процес розрахунку на основі уніфікованих рішень, зафіксованих у цих мережах.

5. Методи чисельної оцінки правильності проставляння розмірів, дозволяють знизити трудомісткість автоматизації етапу технологічної підготовки виробництва, пов'язаного з технологічним контролем конструкторської документації на виріб, за рахунок застосування теоретично обґрунтованих математичних залежностей, що дозволяють визначити потрібну кількість розмірів для деталі, використовуючи строго формалізовані алгоритми, а не теоретичний апарат експертних систем.

6. Використання запропонованої в даній роботі концептуальної моделі ГА на задачах з розмірністю до 10^8 дозволяє виявити резерви підвищення продуктивності технологічної системи, за рахунок інтенсифікації механічної обробки, у середньому на 25% з високою ймовірністю, а на задачах з розмірністю до 8.376×10^{20} , даний підхід дозволяє виявити резерви зниження машинного часу в середньому на 28%, з імовірністю 0,8.

7. Програмно-методичне забезпечення методів еволюційного проектування технологічної системи підвищує ефективність реалізації САПР ТП, що підтверджується практичними результатами втілення на виробничих підприємствах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фролов В. В. Использование XML для разработки и интеграции технологических САПР / В. В. Фролов, Г. Н. Жолткевич // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2003. – №16. – С. 73–82.

2. Фролов В. В. Использование OLE – технологии и фреймового подхода для создания единой среды технологического проектирования / В. В. Фролов,

А. А. Пермяков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – №1(7). – С. 39–41.

3. Фролов В. В. Оптимальное технологическое проектирование для станков с ЧПУ / В. В. Фролов, Г. Н. Жолткевич // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – №5(11). – С. 18–31.

4. Жолткевич Г. Н. Автоматизированное проектирование технологии для многоцелевых станков с ЧПУ с использованием языка XML / Г. Н. Жолткевич, В. В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2004. – №28. – С. 86–97.

5. Жолткевич Г. Н. Об одном подходе к построению информационной модели детали типа тела вращения / Г. Н. Жолткевич, В. В. Фролов, Т. Л. Кононенко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2005. – №39. – С. 123–134.

6. Фролов В. В. Информационная модель связи конструкции с технологией изготовления / В. В. Фролов, Г. Н. Жолткевич, М. С. Иванова // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2007. – №1. – С. 64–72.

7. Фролов В. В. Автоматизированные модули расчета режимов резания для обработки отверстий на многоцелевых станках с ЧПУ / В. В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – №4. – С. 152–157.

8. Фролов В. В. Методика расчета технологических размерных цепей с помощью искусственных нейронных сетей / В. В. Фролов, Г. Н. Жолткевич // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2009. – №1. – С. 96–100.

9. Фролов В. В. Об одном подходе к формированию маршрутов обработки элементарных поверхностей / В. В. Фролов, Г. Н. Жолткевич // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2009. – №2. – С. 114–118.

10. Фролов В. В. Формализация описания геометрической структуры плоских машиностроительных деталей / В. В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – №24. – С. 50–57.

11. Фролов В. В. Классификация технологических структур искусственными нейронными сетями / В. В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць.

Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – №25. – С. 102–109.

12. Фролов В. В. Разработка элементной базы дискретной оптимизации параметров технологической системы / В. В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – №40. – С. 29–33.

13. Фролов В. В. Особенности параметрической оптимизации при фиксированной структуре технологической системы / В. В. Фролов, А. В. Евтухов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – №49. – С. 81–87.

14. Фролов В. В. Комбинаторно-оптимизационное технологическое проектирование на основе структурно-функциональной унификации технологической системы / В. В. Фролов // Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ. – 2010. – Вип. 101: Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – С. 160–166.

15. Фролов В. В. Технологический контроль правильности простановки размеров на 3D моделях деталей / В. В. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №3/1(45). – С. 63–66.

16. Фролов В. В. Реализация генетического алгоритма для двухуровневой оптимизации параметров технологической системы / В. В. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №4/3(46). – С. 33–36.

17. Фролов В. В. Математическая и информационная модели структуры технологической системы / В. В. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №5/4(47). – С. 61–64.

18. Фролов В. В. Анализ и расчет размерных цепей деталей автотракторной техники на основе искусственных нейронных сетей / В. В. Фролов // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Харьков : ХНАДУ. – 2010. – №27. – С. 104–109.

19. Фролов В. В. Формирование эффективных систем механической обработки с использованием генетических алгоритмов / В. В. Фролов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія. – 2010. – №26. – С. 312–317.

20. Фролов В. В. Программное обеспечение параметрической оптимизации технологической системы механической обработки / В. В. Фролов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сборник научных трудов. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2011. – №51. – С. 170–177.

21. Фролов В. В. Расчет технологических размерных цепей на основе мягких вычислений / В. В. Фролов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ "ХПІ". –

2011. – №40. – С. 198–205.

22. Фролов В. В. Использование вычислительного ядра параметрической оптимизации технологической системы при обработке деталей на станках с ЧПУ / В. В. Фролов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць – Краматорськ : Донбаська державна машинобудівна академія. – 2011. – №29. – С. 202–208.

23. Фролов В. В. Метод комбинаторно-оптимизационного проектирования технологических систем механической обработки / В. В. Фролов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Сборник научных трудов. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2012. – №54. – С. 125–131.

24. Фролов В. В. Особенности реализации генетического алгоритма для проектирования технологических систем механической обработки / В. В. Фролов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №3/9(57). – С. 60–64.

25. Фролов В. В. Применение фреймового подхода при проектировании форматно-раскроечных станков / В. В. Фролов // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов». – 2005. – №9(68). – С. 40–45

26. Фролов В. В. Особенности распознавания структурных свойств обрабатываемой детали по ее изображению / В. В. Фролов // Materiály V mezinárodní vědecko – praktická konference «Vědecký průmysl evropského kontinentu – 2009». Díl 14. Technické vědy. Výstavba a architektura. Matematika. Moderní informační technologie. – Praha : Publishing House «Education and Science1» s.r.o. – 2009. – С. 22–24

27. Фролов В. В. Особенности структурно-функциональной унификации технологической системы при комбинаторно-оптимизационном проектировании технологических процессов / В. В. Фролов // Materiály VI mezinárodní vědecko – praktická konference «Efektivní nástroje moderních věd – 2010». Díl 21. Technické vědy. – Praha : Publishing House «Education and Science1» s.r.o. – 2010. – С. 18–20

28. Фролов В. В. Использование генетических алгоритмов для решения комбинаторно-оптимизационных задач технологического проектирования / В. В. Фролов // Materiály VI mezinárodní vědecko – praktická konference «Vědecký pokrok na roumeýí tisíciletí – 2010». Díl 26. Technické vědy. – Praha : Publishing House «Education and Science1» s.r.o. – 2010. – С. 32–34

29. Фролов В. В. Об одном подходе к количественной оценке правильности простановки размеров плоских размерных цепей машиностроительных деталей / В. В. Фролов // Materialy VI miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Naukowa przestrzec Europy – 2010». Volume 18. Techniczne nauki. – Przemysl : Nauka i studia. – 2010. – С. 20–22

30. Фролов В. В. Количественная оценка правильности простановки размеров пространственных размерных цепей машиностроительных деталей / В. В. Фролов // Материали за 6-а международна научна практична конференция «Основни проблеми на съвременната наука – 2010» Том. 23. Технологии. Фи-

зика. – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД.– 2010. – С. 14–16

31. Фролов В. В. Информационная модель структуры машиностроительной детали / В. В. Фролов // Материали за 6-а международна научна практична конференция «Новини за модерна наука – 2010» Том. 21. Технологии. Физика. – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД.– 2010. – С. 14–16

32. Фролов В. В. Решение комбинаторно – оптимизационной задачи проек-тирования технологической операции / В. В. Фролов // Материали за 6-а международна научна практична конференция «Найновите постижения на европейската наука – 2010» Том. 20. Технологии. Физическа култура и спорт. – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД.– 2010. – С. 17–19

АНОТАЦІЯ

Фролов В. В. Автоматизація проектування технологічних систем механічної обробки на основі еволюційних методів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.13.12 – системи автоматизації проектних робіт. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2013.

У дисертації одержав подальший розвиток метод структурно-параметричного синтезу технологічних процесів за рахунок застосування еволюційних методів проектування для автоматизації проектних робіт. У роботі пропонується набір еволюційних методів для різних етапів технологічної підготовки виробництва, які дозволяють реалізувати принципи інваріантності програмного забезпечення й інформаційної єдності при розробці САПР технологічного призначення. Уперше запропонований еволюційний метод проектування структури технологічних систем механічної обробки. Уперше запропонований еволюційний метод дворівневого вибору раціонального сполучення засобів технологічного оснащення. Уперше запропонований еволюційний метод проектування технологічних і складальних розмірних ланцюгів. Одержав подальший розвиток метод кількісної оцінки правильності проставляння розмірів на машинобудівних деталях. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує ці методи.

Ключові слова: технологічна система, технологічна структура, технологічна операція, розмірний ланцюг, генетичний алгоритм, хромосома, ген, багаторівневе програмування, САПР.

АННОТАЦИЯ

Фролов В. В. Автоматизация проектирования технологических систем механической обработки на основе эволюционных методов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2013.

В диссертации получил дальнейшее развитие метод структурно-параметрического синтеза технологических процессов за счет применения эволюционных методов проектирования для автоматизации проектных работ. В

работе предлагается набор эволюционных методов для различных этапов технологической подготовки производства, которые позволяют реализовать принципы инвариантности программного обеспечения и информационного единства при разработке САПР технологического назначения.

Впервые предложен эволюционный метод проектирования структуры технологических систем механической обработки, который решает задачу выбора наиболее рациональной конфигурации технологической системы по минимуму трудоемкости комплексно, учитывая как маршрут обработки всей детали, так и маршруты обработки элементарных поверхностей.

В основу эволюционного метода проектирования технологических структур положена математическая модель в виде помеченного ориентированного дерева с корнем. Данная модель характеризуется следующим: дерево имеет семь уровней; подмножества, входящие во все множество элементов заданного уровня не пересекаются; каждый последующий уровень состоит из подмножеств, которые включают подмножества предыдущего уровня; на каждом подмножестве задается отношение линейного порядка или отношение эквивалентности, по совмещению во времени для элементов, составляющих это подмножество.

Для оценки трудоемкости механической обработки при заданной структуре технологической системы, разработана модель технологической системы в виде нейрореподобной системы.

Разработана математическая модель машиностроительной детали, как множество, состоящее из трех подмножеств упорядоченных пар конструктивных элементов и обладающее свойствами антирефлексивности, антисимметричности и транзитивности. В модели делается акцент на взаимосвязи технологии обработки детали с алгоритмом ее построения на основе классификации элементов формы, построенной по результатам анализа алгоритмов построения трехмерных моделей деталей в различных системах САПР.

Для использования разработанной математической модели в эволюционном проектировании разработана ее информационная модель, где в основу положены концепции языка XML, поскольку теоретические концепции этого языка основаны на древовидном представлении информации. Это позволяет с одной стороны унифицировать модели различных структурных элементов технологической системы, а с другой стороны обеспечивает высокую эффективность различных преобразований над ними за счет использования стандартизированных на уровне операционной системы программных библиотек.

Снижение размерности при проектировании выполняется за счет использования понятия фрейма технологического процесса. Технологический фрейм это структура данных, которая содержит устойчивые стереотипные отношения между элементами технологической системы, обеспечивающие проектирование конкретных гомоморфных технологических систем.

Впервые предложен эволюционный метод двухуровневого выбора рационального сочетания средств технологического оснащения, который, в отличие от существующих, решает задачи выбора средств технологического оснащения и их параметров в комплексе, на основе математической модели многоуровне-

вого программирования. Задача верхнего уровня (ведущий элемент) – оптимизация выбора технологического оснащения, из существующих множеств, по заданному критерию эффективности. Задача нижнего уровня (ведомый элемент) – оптимизация выбора режимных параметров для фиксированных свойств элементов технологической системы.

Впервые предложен эволюционный метод проектирования технологических и сборочных размерных цепей, который за счет использования гибридного генетического алгоритма и нейроразподобных структур, позволяет подобрать допуски составляющих звеньев, обеспечивающие наиболее полное использование допуска замыкающего звена.

Получил дальнейшее развитие метод количественной оценки правильности простановки размеров на машиностроительных деталях, на основе предложенных в данной работе математических моделей. Данные модели позволяют аналитически рассчитать требуемое количество размеров для полного описания детали.

Разработано программное обеспечение, реализующее эти методы: вычислительное ядро параметрической оптимизации технологической системы, которое выполнено в виде СОМ объекта; вычислительное ядро технологического проектирования, выполненного в виде библиотеки классов технологического проектирования; модули расчета размерных цепей.

Ключевые слова: технологическая система, технологическая структура, технологическая операция, размерная цепь, генетический алгоритм, хромосома, ген, многоуровневое программирование, САПР.

ABSTRACT

Frolov V.V. Design automation of technological systems of machining job on the basis of evolutionary methods. – as the manuscript.

Thesis for doctor degree of technical sciences by specialty 05.13.12 – computer aided design systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2013.

In the thesis has had the further development a method of structurally-parametrical synthesis of master schedules at the expense of application of evolutionary design techniques for automation of design operations. In operation the set of evolutionary methods for various stages of technological opening-up of manufacture which allow to realise principles of an invariance of the software and informational unity by working out of a CAM system of technological assignment is offered. For the first time the evolutionary design technique of structure of technological systems of machining job is offered. For the first time the evolutionary method of a two-level choice of a rational combination of means of technological equipment is offered. For the first time the evolutionary design technique of technological and assembly dimensional circuits is offered. Has had the further development a method of a quantitative estimation of correctness простановки the sizes on engineering details. The software realising these methods is developed.

Keywords: technological system, technological structure, operation, dimensional circuit, genetic algorithm, chromosome, gene, multilevel programming, CAM.

Відповідальний за випуск д.т.н., проф. Безкоровайний В.В.

Підп. до друку 24.09.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 1,86. Облік.-вид. арк. 2,2.
Тираж 100 пр. Зам. № 0000. Ціна договірна.

Издательство Технологический центр
Украина, 61145, г. Харьков, ул. Шатилова дача , 4, оф. 702
тел. +38(057)7508990, E-mail: nauka@jet.com.ua, сайт: <http://www.jet.com.ua>

