

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Чернишов Сергій Іванович

УДК 621.7

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОШАРОВОГО
ВИРОЩУВАННЯ ВИРОБІВ
НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ**

Спеціальність - 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2006

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Грабченко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування
ім. М.Ф. Семка.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мовшович Олександр Якович,
Науково-промислове підприємство "Техоснастка", м. Харків,
заступник директора по науковій роботі;
кандидат технічних наук
Криворучко Дмитро Володимирович,
Сумський державний університет, докторант кафедри металорізальних
верстатів та інструментів, м. Суми.

Провідна установа: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
Національної академії наук України, м. Харків.

Захист відбудеться "29" червня 2006 р. о " 14 " годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " ____ " травня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогодні у технічно розвинених країнах активно використовуються різні інтегровані технології пошарового вирощування виробів (Rapid Prototyping). Основною їхньою перевагою є можливість істотного зниження тривалості повного циклу виготовлення виробів, що являє собою суму трьох етапів: створення комп'ютерної моделі, її матеріалізацію й постобробку для кінцевого надання виробові необхідних споживчих властивостей.

Ефективність використання інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів прямо залежить від раціонального вибору методу матеріалізації й можливості попередньої оцінки тривалості повного циклу виготовлення виробу. Причому ця оцінка повинна виконуватися на етапі ухвалення рішення про використання тієї або іншої технології.

Необхідно відзначити, що зі збільшенням рівня комп'ютеризації інтегрованих технологій зростає їхній рівень інкапсуляції (невідомості для користувача використовуваних внутрішніх властивостей і методів). Це у свою чергу призводить до підвищення рівня невизначеності при прогнозуванні тривалості повного циклу виготовлення виробів. Особливо це стосується виконання одноразових проектів, до яких, як правило, відносяться роботи із використанням технології Rapid Prototyping.

Тому підвищення ефективності використання інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів шляхом прогнозування часу їхнього виготовлення на базі статистичного моделювання представляє актуальну наукову й практичну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Виконання дисертаційної роботи пов'язано з держбюджетною науковою тематикою кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" у межах тем: "Створення теорії та методики моделювання процесів різання в тривимірному (3D) просторі на основі багатопараметричних афінних відображень" (ДР № 0102U000976, 2002-2004 рр.); "Розробка теоретичних основ оптимізації прискореного формоутворення виробів на принципах генеративних технологій (Rapid Prototyping)" (ДР № 0105U000576, 2005-2007 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів на основі статистичного прогнозування часу повного циклу виготовлення.

Задачі дослідження:

1. Провести систематику й розробити класифікацію інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів. На базі класифікації розробити інформаційну систему по інтегрованим генеративним технологіям макрорівня, що забезпечує попереднє прийняття обґрунтованих рішень по їх використанню.

2. Створити узагальнену модель тривалості повного циклу створення виробів по інтегрованим комп'ютеризованим генеративним технологіям стосовно до лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS).

3. Виявити способи одержання величин, що мають імовірнісне розподілення, найбільш часто використовуваних у машинобудуванні для опису стохастичних властивостей технологічних параметрів, при статистичному прогнозуванні.

4. Розробити методики переходу від експертних оцінок нечітких величин на базі сімейств трикутних і трапецеїдальних величин до їхніх імовірнісних аналогів стосовно до нечітко визначених технологічних параметрів.

5. Розробити систему статистичного прогнозування вихідних характеристик робочих процесів інтегрованих технологій, яка б забезпечувала можливість оцінки ризиків виконання проектів пошарового створення виробів у заданий термін.

6. Виконати практичну реалізацію розроблених підходів, що забезпечують підвищення ефективності використання інтегрованих генеративних технологій за рахунок зниження рівня ризиків.

Об'єкт дослідження – інтегровані технології пошарового вирощування виробів.

Предмет дослідження – ефективність інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів на основі статистичного прогнозування часу їх виготовлення.

Методи дослідження. Дисертація базується на наукових положеннях технології машинобудування, формоутворення поверхонь, лазерної обробки, теорій ймовірності й нечітких множин, прикладної статистики, викладених у роботах вітчизняних і закордонних вчених. Результати, висновки й рекомендації підтверджено модельними комп'ютерними й натурними експериментами по алгоритмах і методикам, розробленим і реалізованим автором. Експериментальні дослідження виконувалися з використанням системи лазерної стереолітографії SLA 5000; системи вибіркового лазерного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS; оптико-цифрової системи об'ємного сканування Iscan II; приладу Surtonik 3+ для оцінки шорсткості поверхонь виробів. Вірогідність теоретичних досліджень підтверджена практичним використанням результатів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше розроблено класифікацію інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів макрорівня.

2. Сформульовано принцип статистичної невизначеності часу виконання одноразових проектів стосовно до виготовлення виробів методами інтегрованих генеративних технологій, що базується на суттєвому взаємозв'язку рівня комп'ютеризації й зростання рівня інкапсуляції їхніх внутрішніх методів і властивостей. Запропоновано оцінювати невизначеність методом

статистичного моделювання, що включає в себе крім традиційних підходів - нечітко-множинні аналоги імовірнісних розподілів (сімейство трикутних і трапецеїдальних розподілів).

3. Запропоновано, розроблено й практично реалізовано методологію прогнозування тривалості повного циклу генеративного створення виробів, що представляє собою часовий ланцюг, і рівня ризиків невиконання замовлень у заданий термін на базі статистичного моделювання. Отримано розрахункові залежності, що дозволяють формувати технологічні параметри й ланки часового ланцюга із заданими імовірнісними властивостями залежно від рівня невизначеності їх експертних оцінок.

4. Запропоновано й обґрунтовано узагальнену стохастичну модель технологічного часу формоутворення виробів інтегрованими комп'ютеризованими генеративними технологіями макrorівня стосовно до лазерної стереолітографії й селективного лазерного спікання, що забезпечує його статистичне прогнозування.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблено комплекс програмних продуктів, який забезпечує підтримку прийняття рішень щодо вибору і ефективного використання інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів і включає в себе інформаційну систему по інтегрованим генеративним технологіям макrorівня й систему статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій. У рамках системи статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій розроблено комплекс програм, що дозволяє вирішувати наступні практичні задачі: виконувати розрахунки й проводити аналіз стохастичних часових ланцюгів (пряма й зворотна задачі); для лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS) виконувати статистичне прогнозування часу повного циклу створення виробів і необхідного часу побудови на RP-установках, аналізувати структуру часових витрат.

Економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більше 73 тис. грн.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "ХПІ" у циклі дисциплін, пов'язаних з інтегрованими й комп'ютеризованими технологіями: "Програмне забезпечення інтегрованих технологій", "Основи генеративних технологій", "Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні", "Сучасні комп'ютерні технології в дослідженнях" та ін.

Особистий внесок здобувача.

Теоретичні й модельні дослідження, розробка алгоритмів і методик виконано автором самостійно. Постановка задач й аналіз результатів виконані разом з науковим керівником. Проведення виробничих випробувань, розробка програмних продуктів і впровадження результатів роботи виконано разом зі співробітниками Учбово-науково-виробничого центру високих технологій в машинобудуванні при НТУ "ХПІ". Роботи по підготовці деяких статей виконано за

участю співавторів. У роботі наведено посилання на авторів і відповідні джерела при використанні відомих даних.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення й повністю дисертаційна робота доповідалися на наукових семінарах кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (2003-2006), а також на міжнародних науково - технічних конференціях і семінарах: "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2002-2005); "Високі технології: тенденції розвитку" (Харків-Алушта, 2003-2005).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 2 монографії і 6 наукових статей в виданнях, рекомендованих ВАК України, 4 – в матеріалах конференцій і семінарів.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел - 136 найменувань (12 стор.) і додатків (75 стор.). Містить 149 сторінок машинописного тексту, 94 малюнків (58 стор.), 21 таблицю (38 стор.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми й важливість питань, розглянутих у дисертації, сформульовано основні наукові положення й визначено практичне значення досліджень.

Перший розділ присвячено розгляду сучасного стану й тенденцій розвитку машинобудування. Проведено аналіз сутності й ролі виробничих інтегрованих технологій в умовах ринкової економіки.

При аналізі публікацій, що стосуються предметної області інтегрованих технологій пошарового вирішення виробів, встановлено наступне. Розробка технології Rapid Prototyping (RP) з'явилася дійсним проривом в області високих інтегрованих технологій, яка дозволяє у часі й просторі поєднати або надзвичайно зблизити розробку, конструювання й виготовлення типової поодинокі моделі, деталі або виробу в зборі (рис. 1), скоротити час залежно від ступеня складності на 30÷70 % і навіть у кілька разів.

Розвиток потужної обчислювальної техніки, здатної оперувати тривимірними образами, успіхи в розробці лазерних технологій обробки матеріалів стали основою розвитку технологій пошарового створення реальних тривимірних об'єктів будь-якого ступеня складності. RP - інтегрований робочий процес прискореного виготовлення деталей або їхніх прототипів - на сьогоднішній день являє собою органічне сполучення можливостей комп'ютерних технологій обробки інформації, просторового моделювання (CAD), віртуального інжинірингу, сучасних лазерних та ін. способів виготовлення (CAM).

Рисунок 1 - Етапи генеративного створення прототипів і виробів

Разом з тим досить великий потік закордонної інформації переважно рекламного характеру утрудняє споживачам вибір типу установки з тим або іншим способом матеріалізації 3D CAD моделей виробів. Для України, де ці технології поки що застосовуються в дуже обмежених масштабах (усього 3 установки, у той час як у Росії й Білорусії їхня кількість вимірюється десятками), де ще має бути їхнє освоєння в провідних галузях промисловості, потрібна більш об'єктивна інформація про розробки різних фірм США, Німеччини, Японії й ін. країн. У цьому важливу роль могла б зіграти систематизація способів генеративного виготовлення виробів.

Сутнісна обмеженість закордонної інформації, прихована за рекламою, могла б бути заповнена розробкою систем статистичного моделювання процесів інтегрованих генеративних технологій макрорівня. Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності використання інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів є прогнозування часу їхнього виготовлення на базі статистичного моделювання.

На підставі проведеного аналізу визначено мету і основні задачі наукового дослідження.

Другий розділ присвячено методикам, використаним в експериментальних і модельних дослідженнях інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів.

Методологічною основою роботи була ідеологія генеративних технологій, що забезпечують прямий перехід від 3D CAD моделі до твердотілого об'єкта шляхом пошарового його представлення (сукупність 2D моделей) і наступної побудови пошаровим вирощуванням способами лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS).

Робота виконувалася в Центрі високих інтегрованих технологій на базі НТУ "ХПІ". Уперше в Україні він створений в 2001 р. У це учбово-науково-виробниче об'єднання ввійшли Інститут надтвердих матеріалів НАНУ, ЗАТ "Верифікаційні моделі", страхова компанія "Лема", Земельний банк, АТ "Науково-технологічний інститут транскрипції, трансляції, і реплікації", Державне підприємство "Машинобудівний завод ФЭД", Інститут технології машинобудування й НТУ "Харківський політехнічний інститут".

Центр оснащено новітнім устаткуванням, на базі якого організовано декілька систем: систему лазерної стереолітографії на базі установки SLA 5000, систему лазерного селективного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS (рис. 2) і вимірювальну систему на базі скануючої установки Imetric Iscan II, а також профілографа-профілометра мод. Surtronic 3+ та ін.

Модельні дослідження виконувалися з використанням системи статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих генеративних технологій. Аналіз досліджуваних ознак при статистичному моделюванні виконувався за спеціальною методикою. Під досліджуваними

ознаками розуміється комплекс випадкових величин, у який входять значення технологічних параметрів і випадкові величини, одержувані в результаті модельних експериментів при статистичному моделюванні. Статистичний аналіз проводився в кілька етапів: попередній аналіз всіх ознак для одержання загальних статистичних характеристик; кореляційний аналіз досліджуваних ознак; аналіз законів розподілу стосовно заданої окремої досліджуваної ознаки.

Рисунок 2 - Система вибіркового лазерного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS

Третій розділ присвячено вирішенню задач систематики інтегрованих генеративних технологій формоутворення. Визначено принципи систематики інтегрованих генеративних технологій, виділено комплекси їхніх ознак - енергетичний, технологічний, інструментальний, формоутворення і матеріалознавства.

У рамках цих комплексів класифікаційні ознаки розбито на 18 груп, кожна з яких містить від 3 до 21 ознаки. Енергетичний комплекс ознак містить у собі 6 груп: вид енергії, що безпосередньо підводиться до об'єкта (на границі об'єкта й навколишнього середовища); енергію, що визначає утворення форми; розподіл енергії в часі; підведення енергії й розподіл її в просторі, займаному об'єктом; енергоємність процесу формоутворення; зони поглинання енергії. Комплекс матеріалознавських ознак - 2 групи: види застосовуваних матеріалів; методи виготовлення по виду й способу нарощування матеріалу. Комплекс технологічних ознак - 3 групи: технологічні (спосіб реалізації з урахуванням агрегатного стану технологічного середовища); вид середовища обробки; тиск середовища обробки. Комплекс інструментальних ознак - 3 групи: тип, напрямок і швидкість робочих рухів інструмента. Комплекс формоутворюючих ознак був розглянутий як замикаючий, що розкриває зміст принципу пошарового вирощування виробів - 4 групи: головний фізичний процес, що визначає розмірне формоутворення; характер, метод й об'ємні ознаки формоутворення.

З використанням підходів і критеріїв, прийнятих у машинобудуванні, запропонована класифікація, яка дозволила зблизити поняття "інтегровані генеративні технології" із традиційними поняттями технологій, які існували раніше, а урахування ознак, зумовлених специфікою розглянутих процесів, створює можливість більш повно оцінювати технологічні можливості генеративних технологій й окремих способів їхньої реалізації.

Класифікація дозволила розробити інформаційну систему щодо генеративних технологій, яка орієнтована на вивчення особливостей й аналіз можливостей інтегрованих технологій з метою прийняття правильного рішення при їхньому виборі. Основою інформаційної системи є розроблена класифікація й банк даних по предметній області цих технологій. Система містить дані по опису й

класифікації технологій, базу даних устаткування і його технологічні характеристики.

Четвертий розділ присвячено розробці концепції статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій з реалізацією в об'єктно-орієнтованому середовищі програмування. Розглянуто структуру й основні елементи розробленої системи. Сформульовано комплекс умов, необхідних для реалістичного прогнозування вихідних показників робочих процесів в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів (складові повного циклу та технологічного часу виготовлення виробів, характеристики 3D геометрії виробів, параметри лазерного променя та формоутворення). Розроблено методологію генерування значень технологічних параметрів із заданими статистичними властивостями, включаючи експертні розподіли - на базі аналогів нечітко-множинних описів.

При розробці системи моделювання вирішувалися наступні основні задачі, що забезпечують універсальність і розширені можливості для вивчення механізмів формування вихідних характеристик робочих процесів інтегрованих генеративних технологій: моделювання статистичних механізмів формування вихідних характеристик робочих процесів на базі вихідних технологічних параметрів, що задають різними типами числових детермінованих і стохастичних даних; статистичний і кореляційний аналіз заданих параметрів і результуючих вихідних характеристик.

Розроблена система статистичного моделювання вихідних характеристик робочих процесів інтегрованих технологій базується на концепції статистичного моделювання з реалізацією в об'єктно-орієнтованому середовищі програмування. Працездатність системи визначається виконанням сформульованого в роботі комплексу умов, необхідних для реалістичного прогнозування вихідних показників робочих процесів в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів. Реалізація системи статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій виконана на рівні готового програмного продукту.

Вибір методу формування випадкових величин із заданим законом розподілу багато в чому визначає ефективність статистичного моделювання. У роботі використовувався метод зворотної трансформації (метод зворотної функції) і комбінаційний (формування будь-якого відтвореного розподілу за допомогою розподілів, сформованих більш простими засобами). У якості вихідних змінних використовувалися рівномірно розподілені випадкові величини.

На першому етапі були відпрацьовані способи одержання безперервних випадково розподілених величин для 17 законів розподілів, найбільш часто використовуваних у машинобудуванні для опису статистичних властивостей технологічних параметрів і вихідних характеристик процесів. До них відносяться наступні закони розподілу випадкових величин: 1 - рівномірне (прямокутне) $Rand(X_{\min}, X_{\max})$; 2 - нормальне $Norm(\mu, \sigma)$; 3 - логарифмічно нормальне $NormLn(\mu, \sigma)$; 4 - Вейбула $Weibull(b, c)$; 5 - експонентне $Exp(b)$; 6 - логістичне $Logist(a, k)$; 7 - Парето

Pareto(c); 8 - степеневе *Power(c)*; 9 - за законом арксинуса *ArcSin(a, l)*; 10 - трикутний розподіл Сімпсона *Simpson(a, l)*; 11 - трапецеїдальний розподіл Сімпсона *Simpson2(a, l, b)*; 12 - Релея *Relay(σ)*; 13 - Максвелла *Maxwell(σ)*; 14 - Эрланга *Erlang(b, c)*; 15 - Бета-розподіл *Beta(v, w, b)*; 16 - розподіл хі-квадрат $\chi^2(v)$; 17 - F-розподіл $F(v, w)$. Отримані залежності ввійшли складовою частиною в розроблене програмне забезпечення.

На другому етапі була теоретично обґрунтована й підтверджена модельними дослідженнями методика переходу від експертних оцінок нечітких величин на базі сімейств трикутних і трапецеїдальних чисел до їхніх імовірнісних аналогів стосовно до нечітко визначених технологічних параметрів (рис. 3). До них ставляться наступні закони розподілу випадкових величин: 1 - трикутне загального виду $Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$; 2 - прямокутне ліве $TriangLeft(x, X_{min}, X_{max})$; 3 - прямокутне праве $TriangRight(x, X_{min}, X_{max})$; 4 - трапецеїдальний розподіл загального виду $Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$; 5 - трапецеїдальне ліве $TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$; 6 - трапецеїдальне праве $TrapezRight(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$. Отримані кусочно-безперервні залежності для щільності імовірності, інтегральної й зворотної функцій імовірності ввійшли складовою частиною в систему статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій.

Розглянуто питання трансформацій сімейств трикутних і трапецеїдальних розподілів (рис. 4). Висунуто доказову гіпотезу про можливість статистичних трансформацій, аналогічних геометричним для трапецеїдальних, трикутних і рівномірного розподілів. Проведені математичні розрахунки показали, що трансформаційні граничні переходи справедливі для всіх розглянутих експертних розподілів. Ці підходи поширюються не тільки на щільності ймовірності, інтегральні й зворотні функції ймовірності, але й на їхні статистичні характеристики - початкові й центральні моменти й похідні від них.

У п'ятому розділі розглянуто комплекс питань статистичного прогнозування при аналізі часових ланцюгів повного циклу виготовлення виробів генеративними технологіями макрорівня. Представлено результати розробки узагальненої стохастичної моделі тривалості повного циклу створення виробів інтегрованими генеративними технологіями стосовно до лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS). Проведено статистичний аналіз структури технологічного часу. Наведено приклади практичної реалізації розроблених підходів, що забезпечують підвищення ефективності використання інтегрованих технологій за рахунок зниження рівня ризиків при виконанні проектів по їхній реалізації.

Рисунок 4 - Трансформації сімейств трапецеїдальних і трикутних розподілів

Цикл створення виробів генеративними технологіями макрорівня можна представити у вигляді лінійної послідовності періодів:

$$T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3}, \quad (1)$$

де T_{3Dmod} - час створення електронних 3D моделей виробів; T_{Form} - час формоутворення виробів (безпосередньо на установці пошарового вирощування); T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} - часи різних етапів постобробки.

Стосовно до технологій лазерної стереолітографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS) можуть використовуватися наступні постпроцеси: T_{PP1} - постпроцес № 1: SLA - остаточна фотополімеризація виробу в спеціальній ультрафіолетовій камері мод. PCA 500; SLS - очистка виробів від залишкового порошку; T_{PP2} - постпроцес № 2: SLA - витримка виробу в спеціальній низькотемпературній термошафі (для підвищення температури плавлення полімеру); SLS - випалювання полімеру, спікання основного матеріалу й інфільтрація оловянистої бронзи при використанні інкапсульованих у полімер часток металевих порошків (нержавіюча або вуглецева сталь); T_{PP3} - постпроцес № 3 (слюсарне шліфування, полірування, фарбування й ін.).

У кожному періоді має місце процедура еволюції виробу й на кожному її етапі досягається певний еволюційний результат: T_{3Dmod} - файл (або система файлів) триангуляційного опису 3D моделей виробів (в STL-форматі); T_{Form} - пошарова матеріалізація 3D моделей, тобто прямий перехід від електронного образу виробу у твердотільне становище; T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} - надання виробам необхідних експлуатаційних властивостей і необхідної споживчої якості.

Таким чином, цикл створення виробів інтегрованими генеративними технологіями макрорівня складається з ряду закономірно розташованих періодів, що перебувають у взаємозв'язку (ланок), що представляють часовий ланцюг. Поняття часових ланцюгів за аналогією з розмірними ланцюгами при рішенні технологічних задач уведено Б.М. Базровим.

Стосовно до часових ланцюгів створення виробів інтегрованими генеративними технологіями макрорівня має сенс увести визначення прямої й зворотної задач розрахунку, відмінні від прийнятих у розмірних ланцюгах: пряма задача - визначення повного циклу створення виробів шляхом підсумовування часових періодів всіх складових ланок (1); зворотна задача - визначення одного з тимчасових періодів складових ланок при відомому часі повного циклу створення виробів й інших складових ланок. Вирішення зворотної задачі часових ланцюгів розпадається на 5 варіантів відповідно до кількості вихідних складових ланок (1).

Основною особливістю часових ланцюгів створення виробів інтегрованими генеративними технологіями макрорівня є високий ступінь невизначеності значень складових ланок. Це пов'язано з великим числом факторів, вплив яких практично врахувати не уявляється можливим. Таким чином, спроби використання тільки детермінованого підходу приречені на невдачу. Одним з перспективних сучасних підходів до вирішення задач при системній невизначеності вихідних даних є використання нечітких експертних оцінок на базі інтервальних, трикутних, трапецієподібних й ін. чисел.

У даній роботі запропоновано розрахунок часових ланцюгів виконувати методом статистичного прогнозування. Пропонований метод поєднує в собі можливості як повної, так і неповної взаємозамінності з оцінкою довірчої ймовірності знаходження значень замикаючої ланки в заданому інтервалі або ризику виходу за його границі. Сутність статистичного методу полягає в тому, що необхідна область значень замикаючої ланки досягається з деяким ризиком виходу за припустимі границі. Однак цей ризик дозволяє розширити області припустимих значень складових ланок у порівнянні з їхніми значеннями, встановленими методом інтервальних оцінок. Ця можливість створюється малою ймовірністю одночасного виникнення крайніх відхилень у складових ланках.

Приклад вирішення прямої задачі аналізу часових ланцюгів представлено на рис. 5. Ланки часового ланцюга задавалися наступними розподілами: $T_{3Dmod} = TriangRight(x, X_{min} = 8, X_{max} = 16)$; $T_{Form} = Triang(x, X_{min} = 6, X_{mod} = 8, X_{max} = 12)$; $T_{PP1} = Trapez(x, X_{min} = 2, X_{mod1} = 4, X_{mod2} = 6, X_{max} = 12)$; $T_{PP2} = TrapezRight(x, X_{min} = 1, X_{mod} = 2, X_{max} = 5)$; $T_{PP3} = TriangRight(x, X_{min} = 2, X_{max} = 4)$.

Технологічний процес виготовлення (формування) виробів пошаровим вирощуванням для більшості існуючих способів можна представити у вигляді послідовності наступних операцій, що характеризуються часом їхнього виконання:

$$T_{Form} = T_{Home} + T_{Add} + T_{Work} + T_{End}, \quad (2)$$

де T_{Home} - підготовчі операції (монтаж робочої платформи, дозавправлення робочої ємності вихідними матеріалами, стабілізація умов формування): SLA - щодо загального часу формування мають несуттєве значення 0.1÷0.2 години.; SLS - 2.5÷3.5 години. (без врахування зміни матеріалу складової - 7÷9 годин.). Підготовчий час для SLS включає розрівнювання порошку й нагрів (прогрів) робочої зони; T_{Add} - пошарова побудова додаткових технологічних елементів: SLA - нижні опори висотою 6÷10.7 мм (для стоку надлишкового фотомономера) і підтримки (при необхідності, відповідно до конструктивних особливостей виробів і схемою їхнього технологічного базування); SLS - температурний амортизатор товщиною 1.27÷3.5 мм, розташований під основою деталі на глибині 1.5 мм (через прошарок вихідного порошку); T_{Work} - пошарове робоче формування безпосередньо виробів; T_{End} - заключні операції 0.1÷0.2 години. (демонтаж виробів з робочої платформи).

Параметри, що визначають час формування виробів генеративними методами макрорівня T_{Work} , T_{Add} можна розбити на дві групи: узагальнені параметри, що характеризують технологічні властивості виробів по їх 3D геометрії, і технологічні параметри, які побічно або безпосередньо впливають (входячи складовою частиною в розрахункові залежності) на час формування виробів. 3D геометричними узагальненими технологічними параметрами є: X_A , Y_A , Z_A - габаритні розміри по відповідним осям (детерміновані абсолютні значення) і безрозмірні стохастичні

коефіцієнти K_S, K_X, K_Y - незалежні випадкові величини із заданими законами розподілу. До характеристик лазерного променя відносяться наступні параметри: потужність W_L , Вт (непрямий параметр); діаметр плями лазерного променя D_L , мм (для використовуваних у дослідженні установок SLA й SLS - $D_L = 0.23 \div 0.27$); швидкість променя лазера V_L , мм/з: (SLA - $3000 \div 5000$; SLS - $6000 \div 10000$).

Інші технологічні параметри доцільно розглянути при формуванні моделі часу пошарового вирощування. Будь який елементарний акт формування окремого шару може складатися в загальному випадку із чотирьох процедур і визначається часом їхнього виконання: формоутворення шару T_{WS}, T_{AS} (SLA - час впливу лазерного променя на поверхневий шар фотомономерної смоли; SLS - на поверхню порошкового матеріалу); опускання робочої платформи на товщину наступного шару T_{WC}, T_{AC} ; вирівнювання сформованого шару (SLA) або нової порції вихідного матеріалу (SLS) T_{WA}, T_{AA} ; витримка T_{WD}, T_{AD} .

Тоді з урахуванням розглянутих процедур маємо:

$$T_{Work\ i} = T_{WS\ i} + T_{WC\ i} + T_{WA\ i} + T_{WD\ i}; \quad T_{Add\ j} = T_{AS\ j} + T_{AC\ j} + T_{AA\ j} + T_{AD\ j}. \quad (3)$$

Час формоутворення одиничного шару визначається наступними залежностями:

$$T_{WS\ i} = S_A K_S K_{WR} / D_L V_L; \quad T_{AS\ j} = S_A K_{AB} K_{AR} / D_L V_L, \quad (4)$$

де S_A - площа робочої області, займаної виробами, мм²; K_S - імовірнісний коефіцієнт заповнення робочої області деталями; K_{WR} - коефіцієнт проходів лазерного променя при побудові виробів; K_{AB} - коефіцієнт заповнення додаткових технологічних елементів; K_{AR} - коефіцієнт проходів лазерного променя при побудові додаткових технологічних елементів.

Час опускання робочої платформи при створенні окремого шару визначається тим, що вона зі швидкістю V_P (SLA, SLS - $1 \div 3$ мм/с) опускається на товщину формованого шару h (SLA - облікові дискретні значення: 0.05, 0.1, 0.15 мм; SLS - безперервні значення в інтервалі $0.076 \div 0.15$ мм) і додатково може опуститися, а потім піднятися на деяку задану величину h_{WP}, h_{AP} (SLA: $h_{WP} = 0.01 \div 0.02$, $h_{AP} = 6.25 \div 15$ мм; SLS - $h_{WP}, h_{AP} = 0$):

$$T_{WC\ i} = h_C + 2h_{WP} / V_P; \quad T_{AC\ j} = h_C + 2h_{AP} / V_P. \quad (5)$$

Час вирівнювання сформованого шару або нової порції вихідного матеріалу T_{WA}, T_{AA} :

$$T_{WA\ i} = \begin{cases} K_{WC} K_Y Y_A + L_C / V_C, & \text{для SLA;} \\ L_C / V_C, & \text{для SLS;} \end{cases} \quad T_{AA\ j} = \begin{cases} 0, & \text{для SLA;} \\ L_C / V_C, & \text{для SLS,} \end{cases} \quad (6)$$

де K_Y - імовірнісний коефіцієнт розміру перерізу по осі Y , (для SLA - незалежна випадкова величина із заданим законом розподілу для конкретної конфігурації виробів ($0 < K_Y \leq 1$); SLS - не враховується); L_C, V_C - відповідно довжина робочого ходу й швидкість вирівнюючого елемента

установки; KWC - коефіцієнт числа проходів вирівнюючого елемента установки.

Час витримки при побудові одиничних шарів $T_{WD(i)}$, $T_{AD(j)}$ є технологічними параметрами й мають наступний інтервал завдання: SLA (вирівнювання поверхні фотомономера) $T_{WD(i)}$, $T_{AD(j)} = 0 \div 60$ с); SLS (температурна стабілізація) $T_{WD(i)}$, $T_{AD(j)} = 0 \div 1200$ с).

Перехід від часів вирощування окремих шарів $T_{Work(i)}$, $T_{Add(j)}$ до часу формоутворення виробів T_{Work} і додаткових технологічних елементів T_{Add} можна виконати через їхню кількість: $N_W = H_W / h_C$; $N_A = H_A / h_C$, де H_W , H_A - відповідно висоти виробів і додаткових технологічних елементів. Тоді остаточно маємо структурно однорідні вираження для T_{Work} , T_{Add} :

$$T_{Work} = \frac{H_W}{h_C} [T_{WS\ i} + T_{WC\ i} + T_{WA\ i} + T_{WD}]; T_{Add} = \frac{H_A}{h_C} [T_{AS\ j} + T_{AC\ j} + T_{AA\ j} + T_{AD}]. \quad (7)$$

Статистичний аналіз структури технологічного часу виконувався в три етапи з визначенням у кожному з них абсолютних і відносних характеристик для T_{Σ} , $T_{Work(i)}$, $T_{Add(j)}$. Статистичне прогнозування значень відносних характеристик T_{Form} показало, що T_{Work} становить більше 80% від загального часу роботи установок SLA й SLS. Час формоутворення одиничного шару виробів $T_{Work(i)}$ має наступну відносну структуру: формоутворення 50÷99%; опускання робочої платформи до 1%; вирівнювання до 19%; витримка до 27% (SLA); формоутворення до 0.49%; опускання робочої платформи менше 1%; вирівнювання менше 1%; витримка 43÷99% (SLS). Час формоутворення одиничного шару допоміжних технологічних елементів має наступну відносну структуру: формоутворення 62 (99%; опускання робочої платформи до 11%; вирівнювання 0%; витримка до 27% (SLA); формоутворення до 69%; опускання робочої платформи менше 1%; вирівнювання менше 1%; витримка до 4%.

Розроблено узагальнену стохастичну модель тривалості повного циклу створення виробів по інтегрованим комп'ютеризованим генеративним технологіям стосовно до лазерної стереолітографії й селективного лазерного спікання. При її використанні забезпечується виконання статистичного прогнозування часу повного циклу створення виробів і необхідного часу побудови на RP-установках. Можливий аналіз структури часових технологічних ланцюгів часових витрат для всього технологічного процесу або його елементів. Вироби, для яких виконувалося статистичне прогнозування, представлено на рис. 6. Приклад прогнозування в табл. 1.

Рисунок 6 - Приклади виробів, для яких прогнозувався повний цикл створення і час формоутворення на установках SLA и SLS

Таблиця 1 - Порівняльні результати статистичного прогнозування часового ланцюга повного циклу створення пресформи для виготовлення турбінних лопаток (SLS)

Позн.	Ед.	Найменування	Статистичне прогнозування	Факт
$T_{3D\ mod}$	година	3D модель	$Trapez(x, X_{min} = 20, X_{mod1} = 28, X_{mod2} = 32, X_{max} = 40)$	32

T_{Form}	година	формообр. SLS	9.9÷17 при рівні ризику 5.2%	12
T_{PP1}	година	постпроцес 1	$Rand(x, X_{min} = 4, X_{max} = 8)$	6
T_{PP2}	година	постпроцес 2	$Trapez(x, X_{min} = 20, X_{mod1} = 24, X_{mod2} = 28, X_{max} = 32)$	26
T_{PP3}	година	постпроцес 3	$TrapezRight(x, X_{min} = 48, X_{mod} = 64, X_{max} = 96)$	80
T_{Σ}	дн.	повний цикл	12.6÷19.2 при рівні ризику 5.4%	17

Практична реалізація розроблених підходів виконувалася при прийнятті рішень по виконанню реальних замовлень ЗАТ "Верифікаційні моделі", що забезпечило можливість розрахунку часу повного циклу створення виробів для 250 потенційних замовлень без залучення програмного забезпечення установок швидкого прототипування, що у результаті визволило машинний час у розмірі 450 годин. Використання програмних продуктів в 89 випадках призвело до укладання економічно обґрунтованих контрактів. Економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більше 73 тис. грн.

ВИСНОВКИ

1. У результаті теоретичних, модельних і експериментальних досліджень розроблено методологію прогнозування повного циклу створення виробів інтегрованими технологіями пошарового вирощування на базі статистичного моделювання в умовах істотної невизначеності технологічних характеристик процесів, що забезпечує підвищення ефективності використання генеративних технологій макrorівня за рахунок зниження ризиків при виконанні проектів по їхній реалізації.

2. Розроблена науково-обґрунтована класифікація інтегрованих технологій, що базуються на генеративному принципі формоутворення, і інформаційна система на її основі створюють передумови для прийняття обґрунтованих рішень по раціональному застосуванню цих технологій. З використанням підходів і критеріїв, прийнятих у машинобудуванні, класифікація дозволила зблизити поняття "інтегровані генеративні технології" із традиційними поняттями технологій, які існували раніше, а урахування ознак, обумовлених специфікою розглянутих процесів, створило можливість більш повно оцінювати технологічні можливості генеративних технологій і окремих способів їхньої реалізації.

3. На базі запропонованої класифікації розроблено інформаційну систему по інтегрованим генеративним технологіям макrorівня, що забезпечує попереднє прийняття обґрунтованих рішень по їхньому використанню. Розроблена в середовищі управління базами даних, інформаційна система відноситься до прикладних програм, що орієнтована на вивчення особливостей і аналіз можливостей інтегрованих генеративних технологій. Основою інформаційної системи є класифікація і банк даних по предметній області інтегрованих генеративних технологій. Система містить дані описи і класифікаційні ознаки всіх комплексів, устаткування і його технологічних

характеристик і може бути корисною для фахівців в області технології машинобудування, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів.

4. Розроблена система статистичного моделювання вихідних характеристик робочих процесів інтегрованих технологій забезпечує можливість оцінки ризиків виконання проектів по створенню виробів у заданий термін.

5. Розроблено узагальнену стохастичну модель тривалості повного циклу створення виробів по інтегрованим комп'ютеризованим генеративним технологіям стосовно лазерної стереолітографії і селективного лазерного спікання. При її використанні забезпечується виконання статистичного прогнозування часу повного циклу створення виробів і необхідного часу побудови на RP-установках. Можливий аналіз структури технологічних ланцюгів часових витрат для всього технологічного процесу або його елементів.

6. Відпрацьовано способи одержання безперервних випадково розподілених величин для 17 законів розподілів, найбільш часто використовуваних у машинобудуванні для опису статистичних властивостей технологічних параметрів і вихідних характеристик процесів. Отримані залежності ввійшли складовою частиною в розроблене програмне забезпечення.

7. Теоретично обґрунтовано і підтверджено модельними дослідженнями методика переходу від експертних оцінок нечітких величин на базі сімейств трикутних і трапецеїдальних чисел до їх ймовірносних аналогів стосовно нечітко визначених технологічних параметрів. Отримані кусочно-безперервні залежності для щільності імовірності, інтегральної і зворотної функцій імовірності ввійшли складовою частиною в систему статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій.

8. Практична реалізація розроблених підходів виконувалася при прийнятті рішень по виконанню реальних замовлень ЗАТ "Верифікаційні моделі", що забезпечило можливість розрахунку часу повного циклу створення виробів для 250 потенційних замовлень без залучення програмного забезпечення установок швидкого прототипування і, у результаті, визволило машинний час у розмірі 450 годин. Використання програмних продуктів у 89 випадках призвело до укладання економічно обґрунтованих контрактів. Економічний ефект від упровадження результатів роботи склав більше 73 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Везуб Н.В., Витязев Ю.Б., Кнут Х., Лиерат Ф. / Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко - Харьков: ОАО "Модель Вселенной", 2002. - 140 с. Здобувачем виконано аналіз інтегрованих технологій і їхньої ролі в сучасному комп'ютеризованому виробництві.

2. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: 2-е изд., перераб. и доп. / ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., ГРАБЧЕНКО А.И., ЧЕРНЫШОВ С.И., ВЕРЕЗУБ Н.В., ВИТЯЗЕВ Ю.Б., ДОБРОСКОК В.Л., КНУТ Х., ЛИЕРАТ Ф. / Под. ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКОГО, А.И. ГРАБЧЕНКО. - Харьков: ОАО "Модель Вселенной", 2005. - 224 с. Здобувачем розроблено узагальнену модель технологічного часу формоутворення виробів інтегрованими технологіями пошарового вирощування і виконано аналіз структурних складових.

Статті в наукових виданнях:

3. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., ГРАБЧЕНКО А.И., ВЕРЕЗУБ Н.В., ВИТЯЗЕВ Ю.Б., ЧЕРНЫШОВ С.И., КНУТ Х., ЛИЕРАТ Ф. Интегрированные технологии ускоренного изготовления изделий // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПИ". - 2002. - Вип. 1(5). - С. 3-16. Здобувачем виконано порівняльний аналіз інтегрованих технологій Rapid Prototyping, Rapid Tooling і Rapid Manufacturing.

4. Чернышов С.И. Критерии оценки эффективности интегрированного производства на основе технологий Rapid Prototyping // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2002. Вып. 62. - С. 177-179.

5. Чернышов С.И., Грабченко А.И., Витязев Ю.Б., Вереzub Н.В. Технология производства деталей на основе метода стереолитографии // Вісник НТУ "ХПИ". Збірник наук. праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПИ". - 2002. - Вип. 9, т. 11. - С. 103-107. Здобувачем розроблено схему інтегрованих технологічних процесів прискореного формоутворення виробів на базі лазерної стереолітографії.

6. Чернышов С.И., Витязев Ю.Б., Грабченко А.И., Вереzub Н.В. Классификация генеративных технологий по формообразующим и технологическим признакам // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПИ". - 2004. - Вип. 1. - С. 106-112. Здобувачем запропоновано систему класифікаційних технологічних ознак генеративних технологій.

7. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б., Чернышов С.И. Качество изготовления изделий по генеративным технологиям макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. - Харків: НТУ "ХПИ". - 2005. - Вип. 2 (11). - С. 112-129. Здобувачем проведено аналіз впливу стереометричних характеристик виробів і кроку побудови на точність формоутворення.

8. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б., Чернышов С.И. Технологическое время в генеративных технологиях макроуровня // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ". - Вып. 68. - Харьков, 2005. - С. 129-152. Здобувачем розроблено узагальнену модель технологічного часу.

Матеріали конференцій і семінарів:

9. Чернышов С.И., Грабченко А.И., Витязев Ю.Б., Вереzub Н.В. Технология изготовления деталей на основе метода стереолитографии // Тези доп. X міжн. наук.-техн. конф. "Інформаційні

технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" - Харків: НТУ "ХПІ". - 2002. - С. 130-131.

10. Чернышов С.И., Витязев Ю.Б., Грабченко А.И., Вереzub Н.В. Технология изготовления деталей методом ускоренного формообразования // Прогрессивные технологии в машиностроении: Материалы научно-техн. семинара, 21-23 мая 2002 г. - Запорожье-Киев: АТМ Украины. - 2002. - С. 87-93.

11. Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Витязев Ю.Б., Кнут Х., Вереzub Н.В. Интегрированные технологии ускоренного производства изделий на основе стереолитографии // Высокие технологии: тенденции развития. Материалы XII Междунар. науч.-техн. семинара, 12-17 сент. 2002 г. - Харьков-Алушта: НТУ "ХПІ", 2002. - С. 225-226.

12. Грабченко А.И., Витязев Ю.Б., Доброскок В.Л., Чернышов С.И. Технологии изготовления изделий или их прототипов, базирующиеся на генеративном принципе // Тези доп. XIII міжн. наук.-техн. конф. "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" - Харків: НТУ "ХПІ". - 2005. - С. 75-82.

АНОТАЦІЇ

Чернышов С.И. Підвищення ефективності інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів на основі статистичного прогнозування. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 - технологія машинобудування. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2006.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів на основі статистичного прогнозування повного циклу виготовлення.

Проведено систематику і розроблено класифікацію інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів. На базі класифікації розроблено інформаційну систему по інтегрованим генеративним технологіям макрорівня, що забезпечує попереднє прийняття обґрунтованих рішень по їхньому використанню. Розроблено узагальнену модель часового ланцюга повного циклу створення виробів по інтегрованим комп'ютеризованим генеративним технологіям стосовно до лазерної стереолитографії (SLA) і селективного лазерного спікання (SLS). Відпрацьовано способи одержання випадково розподілених величин, найбільш часто використовуваних у машинобудуванні для опису стохастичних властивостей технологічних параметрів, при статистичному прогнозуванні. Розроблено методики переходу від експертних оцінок нечітких величин на базі сімейств трикутних і трапецеїдальних величин до їх ймовірносних аналогів стосовно нечітко визначених технологічних параметрів. Розроблено систему статистичного прогнозування вихідних характеристик робочих процесів інтегрованих технологій, що забезпечує можливість оцінки ризиків виконання проектів пошарового створення виробів у заданий термін. Виконано практичну реалізацію розроблених підходів, що забезпечують

підвищення ефективності використання інтегрованих генеративних технологій за рахунок зниження рівня ризиків.

Ключові слова: інтегровані технології, пошарове вирощування виробів, статистичне прогнозування, часові ланцюги створення виробів, лазерна стереолітографія, селективне лазерне спікання.

Чернышов С.И. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2006.

Диссертация посвящена повышению эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования полного цикла изготовления.

Проведена систематика и разработана классификация интегрированных генеративных технологий послойного выращивания изделий. На базе классификации разработана информационная система по интегрированным генеративным технологиям макроуровня, обеспечивающая предварительное принятие обоснованных решений по их использованию. Разработана обобщенная модель временной цепи полного цикла создания изделий по интегрированным компьютеризированным генеративным технологиям применительно к лазерной стереолитографии (SLA) и селективному лазерному спеканию (SLS). Отработаны способы получения случайно распределенных величин, наиболее часто используемых в машиностроении для описания стохастических свойств технологических параметров, при статистическом прогнозировании. Разработаны методики перехода от экспертных оценок нечетких величин на базе семейств треугольных и трапецеидальных величин к их вероятностным аналогам применительно к нечетко определенным технологическим параметрам. Разработана система статистического прогнозирования выходных характеристик рабочих процессов интегрированных технологий, обеспечивающая возможность оценки рисков выполнения проектов послойного создания изделий в заданные сроки. Выполнена практическая реализация разработанных подходов, обеспечивающих повышение эффективности использования интегрированных генеративных технологий за счет снижения уровня рисков.

Ключевые слова: интегрированные технологии, послойное выращивание изделий, статистическое прогнозирование, временные цепи создания изделий, лазерная стереолитография, селективное лазерное спекание.

S.I. Chernyshov The efficiency increase of computer-integrated technologies of the parts layer

growth on the basis of the statistical prediction. Manuscript.

The Ph.D. thesis in Engineering on the specialty 05.02.08 - the technology of machine building. - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2006.

The Ph.D. thesis is devoted to the efficiency increase of computer-integrated technologies of the parts layer growth on the basis of the statistical prediction of the manufacture complete cycle. The statistical principle of time vagueness of single projects implementation regarding parts manufacture by the methods of computer-integrated generative technologies, based on the interrelation having single meaning of the computerizing level as well as encapsulation level growth of their internal methods and properties, has been formulated at first. The vagueness is proposed to estimate by the statistical modeling method, including indistinct plural analogues of the probabilistic distributions (the family of triangular and trapezoid distributions) except for traditional approaches.

The modern state and development trends of the machine building have been considered. The analysis of the essence and role of productive computer-integrated technologies has been conducted in the market economy conditions.

The systematization has been conducted as well as the classification of computer-integrated generative technologies of the parts layer growth has been developed. The features unification to five complexes – energy, science of materials, technological, tools and forming has been posited. The informative system on computer-integrated generative technologies of macrolevel, providing preliminary decision-making of their use grounded solutions has been developed on the classification base.

The generalized model of temporal chain of the parts creation complete cycle on the integrated computer-controlled generative technologies has been developed regarding the laser stereolithography (SLA) and selective laser sintering (SLS) application. The obtaining methods of the distributed values by chance more often used in machine-building for stochastic properties description of technological parameters have been perfected at the statistical prediction. The transition methods from the unclear values expert estimations on the base of triangular and trapezoid values families to their probabilistic analogues as applied to unclear certain technological parameters have been developed.

The duration prediction methodology of the complete cycle of the parts generative creation, being a temporal chain and the risks level of orders non-fulfillment within the set terms has been offered and practically realized on the base of the statistical modeling. The calculation dependencies, allowing to form the technological parameters and links of temporal chain with the set probabilistic properties depending on the vagueness level of their expert estimations have been obtained. The generalized stochastic model of the parts formation technological time by the integrated computer-controlled generative technologies of the macrolevel as applied to laser stereolithography and selective laser sintering, providing statistical prediction, has been developed.

The practical realization of the developed approaches providing the efficiency increase of the

computer-integrated generative technologies use due to the risks level reduction has been executed. The developed software products are used for the decision-making as for the real orders implementation of the Joint-stock company "Verification models" that provided the complete cycle timing possibility of the parts creation for 250 potential customers without the software application of the machines for Rapid Prototyping, as a result it freed the machine time in the scope of 450 hours. The software products use resulted in the contracts concluding economically grounded in 89 cases. The economic effect from the work achievements application was more than 73 thousands of UAH.

Keywords: computer-integrated technologies, parts layer growth, statistical prediction, temporal chains of parts creation, laser stereolithography, selective laser sintering.