Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Машинобудівний факультет Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

Доброскок В.Л.

ПЛАН ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

з дисципліни «Сучасні комп'ютерні технології в дослідженнях»

Харків

СОДЕРЖАНИЕ

1 СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ	
ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	5
Введение	5
1.1. Структура и основные элементы системы статистического	5
моделирования рабочих процессов интегрированных технологий	
1.2. Особенности прогнозирования выходных показателей рабочих	10
процессов в условиях неопределенности технологических	
параметров	
1.3. Генерирование значений технологических параметров с заданными	17
статистическими свойствами	
1.4. Формирование непрерывных случайных величин	18
1.5. Формирование кусочно-непрерывных случайных величин	19
1.5.1. Треугольное распределение общего вида	20
1.5.2. Трансформации треугольных распределений	24
1.5.3. Трапецеидальное распределение общего вида	27
1.5.4. Трансформации трапецеидальных распределений	28
Заключение	33
Список литературы к разделу 1	34
2 ФОРМИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН	
ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОЧИХ	
ПРОЦЕССОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	38
Введение	38
2.1. Равномерное (прямоугольное) распределение	40
2.2. Нормальное распределение	42
2.3. Логарифмически нормальное распределение	44
2.4. Распределение Вейбулла	44
2.5 Экспоненциальное распределение	47
2.6. Логистическое распределение	50
2.7. Распределение Парето	50
2.8. Степенное распределение	52
2.9. Распределение по закону арксинуса	52
2.10. Треугольное распределение Симпсона	54
2.11. Трапецеидальное распределение Симпсона	56
2.12. Распределение Релея	58
2.13. Распределение Максвелла	60
2.14. Распределение Эрланга	62
2.15. Бета-распределение	64
	2

2.16. Распределение хи-квадрат	66
2.17. F-распределение	66
Заключение	69
Список литературы к разделу 2	70
З ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ЦИКЛА	
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ГЕНЕРАТИВНЫМИ	
ТЕХНОЛОГИЯМИ МАКРОУРОВНЯ	72
Введение	72
3.1. Цикл создания изделий генеративными технологиями макроуровня	72
3.2 Понятие временных цепей	73
3.3. Основные особенности временных цепей	75
3.4. Расчет временных цепей методом статистического прогнозирования	75
3.4.1. Решение прямой задачи временных цепей создания изделий	79
3.4.2. Решение обратной задачи временных цепей создания изделий	82
Заключение	85
Список литературы к разделу 3	85
4 ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ	
ГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАКРОУРОВНЯ	87
Введение	87
4.1. Структурная модель технологического времени	87
4.2. Параметрическая вероятностная модель	88
4.3. Параметры обобщенной модели технологического времени	94
изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня	
4.4. Статистический анализ структуры технологического времени	98
Заключение	101
Список литературы к разделу 4	101
5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ЦИКЛА	
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ	
СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ	103
Введение	103
5.1. Полный цикл создания изделий генеративными технологиями	103
макроуровня	
5.2. Корпус видеомодуля	105
5.2. Панель инструментов стоматологической установки	110
Заключение	115
Список литературы к разделу 5	116

6 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Введение	117
6.1. Полный цикл создания изделий генеративными технологиями	117
макроуровня	
6.2. Корпуса приборов для создаваемой системы «ГЛОНАСС»	119
6.3. Прессформа для изготовления турбинных лопаток	124
6.4. Корпуса катушек для погружных нефтяных насосов	128
Заключение	133
Список литературы к разделу 6	134

117

1. СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Введение

Изложена концепция статистического моделирования рабочих процессов интегрированных генеративных технологий с реализацией в объектноориентированной среде программирования. Рассмотрены структура и основные элементы разработанной системы. Сформулирован комплекс условий, необходимых для реалистического прогнозирования выходных показателей рабочих процессов генеративных технологий в условиях различного уровня неопределенности значений технологических параметров. Именно такими свойствами обладают составляющие полного цикла и технологического времени создания изделий, характеристики 3D геометрии изделий, параметры лазерного луча, формообразования и др. характеристики. Представлена значений методология генерирования технологических параметров С заданными статистическими свойствами, включая экспертные распределения на базе аналогов нечетко-множественных описаний.

1.1. Структура и основные элементы системы статистического моделирования рабочих процессов интегрированных технологий

Система статистического моделирования рабочих процессов интегрированных технологий предназначена для исследования статистических механизмов формирования их выходных характеристик (времени полного цикла создания изделий, технологического времени их формообразования и структурных составляющих процесса) с учетом уровня неопределенности исходных параметров (составляющие полного цикла создания изделий, 3D характеристики геометрии, ИХ параметры лазерного луча И формообразования).

Данная система разработана в объектно-ориентированной среде создания приложений Visual FoxPro. При разработке системы моделирования решались следующие основные задачи, обеспечивающие универсальность И расширенные возможности для изучения механизмов формирования выходных характеристик рабочих процессов интегрированных генеративных технологий: моделирование статистических механизмов формирования выходных характеристик на базе исходных технологических параметров, задаваемых различными типами числовых детерминированных и стохастических данных; статистический И корреляционный анализ исходных параметров И результирующих выходных характеристик.



интегрированных технологий

Главная экранная форма системы представлена на рис. 1.1. На экранной форме предлагаются список номеров моделей (расчетов) с возможностью их группирования и сохранения вариантов расчета, возможности редактирования процедуры формирования выходных характеристик, выполнения расчета и просмотра результатов статистического анализа исходных параметров и выходных характеристик.

Система моделирования предоставляет пользователю следующие основные возможности для работы:

- создавать процедурные модели рабочих процессов (до 999); для каждой модели возможно создание на ее основе до 999 вариантов, обладающих различными характеристиками исходных технологических параметров; объединять модели в тематические группы (до 999) для удобства систематизации и навигации;
- редактировать описания моделей, вариантов и групп расчетов (рис. 1.1);
- определять до 27 исходных параметров, а также субпараметры:
 6 логических и 1 числовой для каждой из описанных моделей;
- использовать описание исходных параметров (рис. 1.4, 1.6) и субпараметров (рис. 1.1);
- задавать константу инициализации функции генерации псевдослучайных чисел и размер генерируемой выборки данных статистических испытаний (рис. 1.1);
- редактировать программный код процедуры описания модели для заданного расчета;
- автоматически выполнять статистический и корреляционный анализы для выбранной группы исследуемых признаков (в каждой группе по 9 исследуемых признаков: 0-я группа включает в себя результирующие характеристики процесса (R1, R2, R3, X1, X2, X3, Y1, Y2, Y3); 1-я группа соответствует исходным параметрам № 1÷9, 2-я – № 10÷18, 3-я – № 19÷27);
- задавать количество интервалов гистограмм исследуемых признаков (с возможностью использования рекомендаций по его выбору);
- контролировать результаты автоматической регистрации и даты-времени расчета и анализа исследуемых признаков (рис. 1.1);
- выполнять общие настройки системы: установку маршрутов к каталогам размещения системных баз данных и результатов моделирования; ручную или автоматическую установку каталогов для запуска и работы внешних приложений; параметры режимов вывода графиков визуализации исследуемых признаков (экранная форма представлена на рис. 1.2);



Рисунок 1.2 – Страничные блоки экранной формы общих настроек системы статистического моделирования



Рисунок 1.3 – Экранная форма настройки параметров статистических законов распределений

- задавать закон и настраивать параметры распределений с определением их технологических наименований (кратких и полных), задавать интервалы допустимых значений с возможностью установки их дополнительных характеристик (рис. 1.3);
- определять тип числовых значений для каждого исходного параметра статистической системы: детерминированный; статистический (предлагается меню выбора со списком распределений из 17 наиболее применяемых в технологии машиностроения) или нечеткий (меню выбора экспертных распределений на основе аналогов интервальных, треугольных и трапецеидальных чисел); имеется дополнительная возможность усечения интервала возможных значений, дискретизация значений и задание списка возможных значений (рис. 1.6);
- выполнять просмотр результатов статистического (рис. 1.1, 1.4) и корреляционного (рис. 1.4) анализа с визуализацией гистограмм относительных частот исследуемых признаков;
- выводить комплекс статистических характеристик (используемых в прикладной статистике [1, 6, 22]) для заданного исследуемого признака с возможностью получения справочной информации по определению каждой из них (рис. 1.5);
- одновременно представлять гистограммы 9 исследуемых признаков на общей экранной форме (рис. 1.4);
- использовать подсистемы статистического и регрессионного углубленного анализа гистограммы исследуемого признака (рис. 1.7);
- получать интерактивную справку по каждому элементу экранных форм посредством всплывающей подсказки или справочной системы, вызывающей панель инструментов с информацией по выбранному элементу (примеры представлены на рис. 1.4, 1.5);
- использовать справочные данные по статистическим законам распределения (рис. 1.3, 1.6).

1.2. Особенности прогнозирования выходных показателей рабочих процессов в условиях неопределенности технологических параметров

Метод моделирования широко применяют в таких областях, как автоматизация проектирования и организации в автоматизированных системах научных исследований, в системах исследования и проектирования, в системах массового обслуживания, анализ различных сторон деятельности человека, автоматизированное управление производственными и другими процессами. Важно подчеркнуть, что моделирование используется при проектировании, создании, внедрении, эксплуатации систем, а также на различных уровнях их





Рисунок 1.5 - Экранная форма результатов статистического анализа отдельного исследуемого признака



Рисунок 1.6 - Характеристики генерирования значений параметра (пример: DL - диаметр луча лазера)



Рисунок 1.7 – Статистический анализ соответствия выборочных данных теоретическому закону распределения для заданного исследуемого признака изучения, начиная от анализа работы элементов и кончая исследованием системы в целом при их взаимодействии с окружающей средой.

На этапе исследования и проектирования систем при построении и реализации машинных моделей широко используется метод статистического моделирования (Монте-Карло), который базируется на использовании случайных чисел, т. е. возможных значений некоторой случайной величины с заданным распределением вероятностей [4, 8, 11, 20]. Статистическое моделирование представляет собой метод получения с помощью ЭВМ статистических данных о процессах, происходящих в моделируемой системе. Для получения представляющих интерес оценок характеристик моделируемой системы с учетом воздействий внешней среды статистические данные классифицируются обрабатываются с И использованием методов математической статистики.

Сущность метода статистического моделирования сводится к построению для процесса функционирования исследуемой системы некоторого моделирующего алгоритма, имитирующего поведение и взаимодействие элементов системы с учетом случайных входных воздействий и реализации этого алгоритма с использованием программно-технических средств ЭВМ.

Различают две области применения метода статистического моделирования: для изучения стохастических систем; для решения детерминированных задач.

Основной идеей, которая используется для решения детерминированных задач методом статистического моделирования, является замена детерминированной задачи эквивалентной схемой некоторой стохастической системы, выходные характеристики последней совпадают с результатом При такой решения детерминированной задачи. замене погрешность уменьшается с увеличением числа испытаний (реализации моделирующего алгоритма).

В результате статистического моделирования системы получается серия частных значений искомых величин или функций, статистическая обработка которых позволяет получить сведения о поведении реального объекта или процесса в произвольные моменты времени. Если количество реализации N достаточно велико, то полученные результаты моделирования системы приобретают статистическую устойчивость и с достаточной точностью могут быть приняты в качестве оценок искомых характеристик процесса функционирования системы.

При статистическом моделировании систем одним из основных вопросов является учет стохастических воздействий. Количество случайных чисел, используемых для получения статистически устойчивой оценки

характеристики процесса функционирования системы при реализации моделирующего алгоритма на ЭВМ, колеблется в достаточно широких пределах в зависимости от класса объекта моделирования, вида оцениваемых необходимой точности И достоверности характеристик, результатов моделирования. Для метода статистического ЭВМ моделирования на характерно, что большое число операций, а соответственно большая доля машинного времени расходуются на действия со случайными числами. Кроме того, результаты статистического моделирования существенно зависят от качества исходных (базовых) последовательностей случайных чисел. Поэтому наличие простых и экономичных способов формирования последовательностей случайных чисел требуемого качества во многом определяет возможность практического использования машинного моделирования системы.

Понятие «статистическое моделирование» тесно связано с понятием «метод Монте-Карло» и почти ему тождественно. Для решения задач методом Монте-Карло необходимо получать на ЭВМ последовательность выборочных значений случайной величины с заданным распределением. Такой процесс принято называть моделированием случайной величины. Случайные величины обычно моделируют с помощью преобразований одного или нескольких независимых значений случайной величины, равномерно распределенной в интервале (0, 1).

Можно выделить следующие этапы моделирования случайных величин:

- генерирование *N* реализаций случайной величины с требуемой функцией распределения;
- преобразование полученной величины, определяемой математической моделью;
- статистическая обработка реализации.

Особенностью первого этапа является то, что все методы для получения заданного распределения используют преобразование равномерно распределенной величины.

Конструктивно задаются случайные величины, равномерно распределенные в интервале (0, 1), далее производится их отображение, и получаются новые случайные величины с распределением, определяемым решаемой задачей, что в общем случае может быть довольно сложным.

Далее следует получение некоторых характеристик. Чаще всего находят оценки математического ожидания и дисперсии.

В результате можно выделить следующие этапы статистического моделирования: подготовка исходных данных; генерирование равномерно распределенных случайных чисел; преобразования для получения заданных законов распределений для заданных параметров модели; выполнение дополнительных преобразований параметров модели в соответствии с решаемой задачей и получение выходных характеристик изучаемого процесса; статистическая обработка результатов моделирования.

В настоящее время большинство исследователей склонны рассматривать нечеткость и случайность как два качественно разных вида неопределенности. С одной стороны, нечеткость касается величин и отношений, границы которых неточно определены, т. е. когда их нельзя адекватно определить (описать), используя понятия обычного множества поскольку переход от принадлежности к непринадлежности множеству уже не имеет скачкообразного характера. С другой стороны, случайность касается ситуаций, в которых событие точно определено, а неопределенным является вероятность его наступления [9].

1.3. Генерирование значений технологических параметров с заданными статистическими свойствами

В настоящее время при решении прикладных задач все большее применение получают статистического (стохастического) методы моделирования [3, 11, 12, 18, 20, 27, 29, 30], синоним - метод Монте-Карло. Особый интерес представляет их использование для решения задач, связанных с прогнозированием результатов использования интегрированных технологий, в частности, рабочих процессов создания изделий методом послойного выращивания, когда выходные показатели процесса зависят от достаточно 19]. большого количества параметров [13, связи между которыми программном обеспечении компьютеризированного инкапсулированы В оборудования [5, 28].

Методы статистического моделирования (статистических испытаний) можно определить как методы решения математических задач и задач исследования сложных систем при помощи моделирования случайных реализаций и имитации случайных процессов, происходящих в сложных системах, с последующей оценкой их вероятностных характеристик [11, 27].

Чем сложнее решаемая задача, тем более эффективным оказывается применение метода статистических испытаний, а в некоторых случаях это единственный метод решения. Область применимости методов статистических испытаний принципиальных ограничений не имеет.

Построение и экспериментальная проверка модели обычно основаны на использовании априорной информации о природе и характере исследуемых соотношений и исходных статистических данных, характеризующих процесс и результат функционирования анализируемой системы.

В разработанной системе реализованы следующие этапы статистического моделирования:

- Подготовка исходных данных (создание математической модели изучаемого объекта, задание входных переменных и выходных характеристик). Входные переменные могут быть как стохастическими (иметь заданный закон распределения, область задания и значения его параметров), так и детерминированными.
- Формирование выборок значений входных переменных и выходных характеристик (исследуемых признаков) в соответствии с принятой математической моделью и задачами исследования.
- Статистическая обработка результатов моделирования. В общем случае она может иметь следующие составляющие: определение выборочных статистических характеристик исследуемых признаков (среднее арифметическое, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и пр.); корреляционный и регрессионный анализ исследуемых признаков; анализ результирующих распределений на предмет соответствия известным по критериям согласия; визуализация и протоколирование результатов.

Выбор метода формирования непрерывных случайных величин с заданным законом распределения во многом определяет эффективность статистического моделирования.

К основным методам формирования случайных величин можно отнести метод обратной трансформации [29] (метод обратной функции [27]) и комбинационный (формирование любого воспроизводимого распределения с помощью распределений, формируемых более простыми средствами). В качестве исходных обычно используются равномерно распределенные случайные величины.

Метод обратной трансформации, получивший наиболее широкое распространение, заключается в следующем. Пусть непрерывная (или кусочнонепрерывная) случайная величина X задана плотностью $f_X(x)$ и интегральной

функцией вероятности $F_X(x) = \int_{-\infty}^{x} f_X(x) dx$. Взаимнооднозначная функция

 $G_{X}(p)$, полученная решением относительно *p* уравнения $F_{X}(x) = p$, преобразует равномерно распределенную в интервале (0, 1) случайную величину *p* в величину *X* с требуемой плотностью распределения вероятности $f_{X}(x)$.

1.4. Формирование непрерывных случайных величин

На первом этапе отработки общей методологии формирования случайных

величин были рассмотрены наиболее часто применяющиеся в теории вероятностей и прикладной статистике законы распределения. К ним относятся следующие законы распределения случайных величин: 1 - равномерное (прямоугольное) Rand (X_{\min}, X_{\max}) ; 2 - нормальное Norm (μ, σ) ; 3 логарифмически нормальное NormLn (μ, σ) ; 4 - Вейбулла Weibull(b,c); 5 экспоненциальное Exp(b); 6 - логистическое Logist(a,k); 7 - Парето Pareto(c); 8 - степенное Power(c); 9 - по закону арксинуса ArcSin(a,l); 10 треугольное paспределение Симпсона Simpson(a,l); 11 - трапецеидальное paспределение Симпсона Simpson2(a,l,b); 12 - Релея Relay (σ) ; 13 - Максвелла Maxwell (σ) ; 14 - Эрланга Erlang(b,c); 15 - Бета-распределение Beta(v,w,b); 16 - распределение хи-квадрат $\chi^2(v)$; 17 - F-распределение F(v,w).

В качестве информационно-методической базы по законам распределений использовались следующие источники: [1, 10, 14, 15, 21, 22, 23, 24, 29, 30, 31].

По результатам проведенных исследований разработана общая схема формирования случайных величин для 17 наиболее часто применяющихся законов распределения (рис. 1.8).

Проведенные аналитические расчеты соответствия плотностей, интегральных и обратных функций вероятностей, выполненные в рамках единой методологии, позволили получить систему зависимостей, обеспечивающих формирование непрерывных случайных величин с заданными законами распределения [26].

1.5. Формирование кусочно-непрерывных случайных величин

На втором этапе отработки общей методологии формирования случайных величин рассмотрим экспертные распределения, аналогом которых являются нечеткие случайные величины на основе интервальных, треугольных и трапециевидных чисел [2, 9, 16, 17]. К ним относятся следующие законы распределения случайных величин: 1 - треугольное общего вида *Triang*(x, X_{min} , X_{mod} , X_{max}); 2 - прямоугольное левое *TriangLeft*(x, X_{min} , X_{max}); 3 - прямоугольное правое *TriangRight*(x, X_{min} , X_{max}); 4 - трапецеидальное распределение общего вида *Trapez*(x, X_{min} , X_{mod1} , X_{mod2} , X_{max}); 5 - трапецеидальное левое *TrapezLeft*(x, X_{min} , X_{mod} , X_{max}).

В процессе исследований была выдвинута гипотеза о возможности статистических трансформаций, аналогичных геометрическим для трапецеидальных, треугольных и равномерного распределений. Взаимосвязь и

трансформации семейств трапецеидальных и треугольных распределений представлены на рис. 1.9.



Рассмотрим плотности вероятности, интегральные и обратные функции вероятности с визуализацией примеров для этих распределений более подробно.

1.5.1. Треугольное распределение общего вида

Треугольное Triang($x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}$). Треугольное распределение общего вида значений параметра X - значения параметра находятся в интервале $X_{min} \div X_{max}$, а модальное значение соответствует значению X_{mod} ($X_{min} < X_{mod} < X_{max}$).

Определение нормирующего коэффициента по оси $Y \to K_{f}$. производится из равенства интеграла плотности вероятности (площади треугольника)



21

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_{Distr}(x) dx = 1.$$
(1.1)

Для треугольного распределения имеем:

$$K_{f} \left(X_{mod} - X_{min} \right) / 2 + K_{f} \left(X_{max} - X_{mod} \right) / 2 = 1.$$
 (1.2)

Тогда максимальное значение плотности вероятности (высота треугольника), соответствующее нормирующему коэффициенту по оси *У* определяется выражением:

$$K_f = 2/(X_{max} - X_{min}).$$
 (1.3)

Плотность вероятности для треугольного распределения общего вида $f_{Triang}(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$, где $X_{min} < X_{mod} < X_{max}$, представляет собой кусочно-непрерывную функцию на интервале задания $X_{min} \div X_{max}$ и непрерывна на интервалах $X_{min} \div X_{mod}$, $X_{mod} \div X_{max}$. Для всего интервала задания плотность вероятности треугольного распределения общего вида (рис. 1.10) определяется следующей формулой:

$$f_{\text{Triang}}\left(x\right) = \begin{cases} \frac{2}{X_{max} - X_{min}} \frac{x \cdot X_{min}}{X_{mod} - X_{min}}, & X_{min} \leq x \leq X_{mod}; \\ \frac{2}{X_{max} - X_{min}} \left(1 - \frac{x \cdot X_{mod}}{X_{max} - X_{mod}}\right), & X_{mod} \leq x \leq X_{max}; u \text{ Have } 0. \end{cases}$$
(1.4)

Выражение для функции распределения находится интегрированием плотности вероятности по интервалам непрерывности. Для всего интервала задания интегральная функция вероятности треугольного распределения общего вида (рис. 1.11) определяется следующей формулой:

$$F_{Triang}(x) = \begin{cases} 0, & x < X_{min} \\ \frac{(x - X_{min})^2}{(X_{max} - X_{min})(X_{mod} - X_{min})}, & X_{min} \le x \le X_{mod}; \\ \frac{x(2X_{max} - x) + X_{min} X_{mod} - X_{max}(X_{mod} + X_{min})}{(X_{max} - X_{min})(X_{mod} - X_{min})}, & X_{mod} \le x \le X_{max}; \\ 1, & X_{max} < x. \end{cases}$$
(1.5)

Выражение для обратной функции распределения $G_{Triang}(p, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$ находится решением уравнения интегральной функции распределения $F_{Triang}(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}) = p$ относительно x по интервалам непрерывности. Для всей области определения $0 \le p \le 1$ обратная 22



функция вероятности треугольного распределения общего вида (рис. 1.12) определяется следующей формулой:

$$G_{Triang}(p) = \begin{cases} X_{min} + \sqrt{p(X_{max} - X_{min})(X_{mod} - X_{min})}, & 0 \le p \le \frac{X_{mod} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}; \\ X_{max} - \sqrt{(1-p)(X_{max} - X_{min})(X_{max} - X_{mod})}, & \frac{X_{mod} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \le p \le 1. \end{cases}$$
(1.6)

1.5.2. Трансформации треугольных распределений

TriangLeft(x, X_{min} , X_{max}). Треугольное левое распределение значений параметра x - значения параметра находятся в интервале X_{min} ÷ X_{max} , а модальное значение соответствует максимальному значению $x_{mod} = X_{max}$.

Переход от треугольного распределения общего вида к треугольному левому (рис. 1.9) осуществляется предельным перемещением вершины треугольника $X_{mod} \Rightarrow X_{max}$. Проведенные математические расчеты показали, что этой трансформации соответствует предельный переход для плотности вероятности (рис. 1.13), интегральной (рис. 1.14) и обратной (рис. 1.15) функции вероятности:

$$TriangLeft(x, X_{min}, X_{max}) = \lim_{X_{mod} \to X_{max}} Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}); \quad (1.7)$$

Тогда, выполнив предельный переход, получим:

$$f_{TriangLeft}(x) = 2(x - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}), \quad X_{min} \le x \le X_{max}; uhave 0; \quad (1.8)$$

$$F_{TriangLeft}(x) = \begin{cases} 0, & x < X_{min} \\ (x - X_{min})^2 / (X_{max} - X_{min})^2, & X_{min} \le x \le X_{max}; \\ 1, & X_{max} < x. \end{cases}$$
(1.9)

$$G_{TriangLeft}\left(p\right) = X_{min} + \sqrt{p}\left(X_{max} - X_{min}\right); 0 \le p \le 1.$$

$$(1.10)$$

TriangRight(x, X_{min} , X_{max}). Треугольное правое распределение значений параметра x - значения параметра находятся в интервале X_{min} ÷ X_{max} , а модальное значение соответствует минимальному значению $X_{mod} = X_{min}$.

Переход от треугольного распределения общего вида к треугольному правому (рис. 1.9) осуществляется предельным перемещением вершины треугольника $X_{mod} \Rightarrow X_{min}$. Проведенные математические расчеты показали, что этой трансформации соответствует предельный переход для плотности вероятности (рис. 1.16), интегральной (рис. 1.17) и обратной (рис. 1.18)





функции вероятности:

$$TriangRight(x, X_{min}, X_{max}) = \lim_{X_{mod} \to X_{min}} Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}); \quad (1.11)$$

Тогда, выполнив предельный переход, получим:

$$f_{TriangRight}(x) = 2(X_{max} - x)/(X_{max} - X_{min})^2, \quad X_{min} \le x \le X_{max}; u \mu a \forall e 0.$$
(1.12)

$$F_{TriangRight}\left(x\right) = \begin{cases} 0, & x < X_{min} \\ \frac{x(2X_{max} - x) + X_{min}^{2} - 2X_{max} X_{min}}{\left(X_{max} - X_{min}\right)^{2}}, & X_{min} \le x \le X_{max}; \\ 1, & X_{max} < x. \end{cases}$$
(1.13)

$$G_{TriangRight}(p) = X_{max} - \sqrt{1-p} (X_{max} - X_{min}); 0 \le p \le 1.$$
(1.14)

1.5.3. Трапецеидальное распределение общего вида

 $Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$. Трапецеидальное распределение общего вида значений параметра X - значения параметра находятся в интервале $X_{min} \div X_{max}$, а модальное значение находится в интервале $X_{mod1} \div X_{mod2}$ ($X_{min} < X_{mod1}$ $< X_{mod2} < X_{max}$).

Определение нормирующего коэффициента по оси $Y \to K_{f}$ производится из равенства интеграла плотности вероятности (площади трапеции) единице (1.1). Тогда для трапецеидального распределения имеем:

$$K_{f} \left(X_{mod1} - X_{min} \right) / 2 + K_{f} \left(X_{mod2} - X_{mod1} \right) + K_{f} \left(X_{max} - X_{mod2} \right) / 2 = 1.$$
(1.15)

Максимальное значение плотности вероятности (высота трапеции), соответствующее нормирующему коэффициенту по оси *Y*, определяется выражением:

$$K_f = 2/(X_{max} - X_{min} + X_{mod\,2} - X_{mod\,1}), \tag{1.16}$$

где знаменатель представляет собой сумму нижнего и верхнего оснований трапеции.

Плотность вероятности для трапецеидального распределения общего вида $f_{Trapez}(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$, где $X_{min} < X_{mod1} < X_{mod2} < X_{max}$, представляет собой кусочно-непрерывную функцию на интервале задания $X_{min} \div X_{max}$ и непрерывна в интервалах $X_{min} \div X_{mod1}$, $X_{mod1} \div X_{mod2}$,

 $X_{mod2} \div X_{max}$. Для всего интервала задания плотность вероятности трапецеидального распределения общего вида (рис. 1.19) определяется следующей формулой:

$$f_{Trapez}(x) = \begin{cases} \frac{2(x - X_{min})}{(X_{max} - X_{min} + X_{mod2} - X_{mod1})(X_{mod1} - X_{min})}, & X_{min} \le x \le X_{mod1}; \\ \frac{2/(X_{max} - X_{min} + X_{mod2} - X_{mod1})}{(X_{max} - x)}, & X_{mod1} \le x \le X_{mod2}; \\ \frac{2(X_{max} - x)}{(X_{max} - X_{min} + X_{mod2} - X_{mod1})(X_{max} - X_{mod2})}, & \lambda_{mod2} \le x \le X_{max}; \end{cases}$$

Выражение для функции распределения находится интегрированием плотности вероятности по интервалам непрерывности. Для всего интервала задания интегральная функция вероятности трапецеидального распределения общего вида (рис. 1.20) определяется следующей формулой:

$$F_{Trapez}\left(x\right) = \begin{cases} k = X_{max} - X_{min} + X_{mod\,2} - X_{mod\,1}; \\ \left(x - X_{min}\right)^{2} / k \left(X_{mod\,1} - X_{min}\right), X_{min} \le x \le X_{mod\,1}; 0, x < X_{min}; \\ \left[2x - \left(X_{min} + X_{mod\,1}\right)\right] / k, \quad X_{mod\,1} \le x \le X_{mod\,2}; 1, x > X_{max}; \\ \frac{X_{max} \left(2x - X_{mod\,1} - X_{min}\right) - X_{mod\,2} \left(X_{mod\,2} - X_{mod\,1} - X_{min}\right) - x^{2}}{k \left(X_{max} - X_{mod\,2}\right)}, \\ X_{mod\,2} \le x \le X_{max}. \end{cases}$$
(1.18)

Выражение для обратной функции распределения $G_{Trapez}(p, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$ находится решением уравнения интегральной функции распределения $F_{Trapez}(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max}) = p$ относительно x по интервалам непрерывности. Для всей области определения $0 \le p \le 1$ обратная функция вероятности трапецеидального распределения общего вида (рис. 1.21) определяется следующей формулой:

$$G_{Trapez}(p) = \begin{cases} k = X_{max} - X_{mod1} + X_{mod2} - X_{min}; \\ X_{min} + \sqrt{p \ k \ (X_{mod1} - X_{min})}, & 0 \le p \le (X_{mod1} - X_{min}) k^{-1}; \\ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} p(X_{max} + X_{mod2}) + \\ +(1-p)(X_{min} + X_{mod1}) \end{bmatrix}, & (X_{mod1} - X_{min}) k^{-1} \le p \le \\ x_{max} - \sqrt{(1-p) \ k \ (X_{max} - X_{mod2})}, & 2X_{mod2} - (X_{min} + X_{mod1}) k^{-1} \le p \le 1. \end{cases}$$
(1.19)

1.5.4. Трансформации трапецеидальных распределений

 $TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$. Трапецеидальное левое распределение значений параметра x - значения параметра находятся в интервале $X_{min} \div X_{max}$, а 28



Переход распределения общего трапецеидального вида OT к трапецеидальному левому (рис. 1.9) осуществляется предельным перемещением правого интервального значения верхнего основания трапеции к максимальному значению $X_{mod2} \Rightarrow X_{max}$ с присвоением обозначения $X_{mod1} \equiv X_{mod}$. Проведенные математические расчеты показали, что этой трансформации соответствует предельный переход для плотности вероятности, интегральной и обратной функции вероятности:

$$TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}) = \lim_{\substack{X_{mod} \ge \to X_{max} \\ X_{mod} = X_{mod}}} Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max}).$$
(1.20)

Тогда, выполнив предельный переход, получим:

$$f_{TrapezLeft}(x) = \begin{cases} \frac{2(x - X_{min})}{(2X_{max} - X_{mod} - X_{min})(X_{mod} - X_{min})}, & X_{min} \le x \le X_{mod}; \\ \frac{2}{(2X_{max} - X_{mod} - X_{min})}, & X_{mod} \le x \le X_{max}; & 0 \text{ unave.} \end{cases}$$
(1.21)

$$F_{TrapezLeft}(x) = \begin{cases} \frac{(x - X_{min})^2}{(2 X_{max} - X_{min} - X_{mod})(X_{mod} - X_{min})}, \\ X_{min} \le x \le X_{mod}; 0, x < X_{min}; \\ (2 x - X_{mod} - X_{min})/(2 X_{max} - X_{min} - X_{mod}), \\ X_{mod} \le x \le X_{max}; 1, X_{max} < x. \end{cases}$$

$$G_{TrapezLeft}(p) = \begin{cases} P_1 = (X_{mod} - X_{min})/(2 X_{max} - X_{mod} - X_{min}); \\ X_{min} + \sqrt{p \left[2 X_{max} \left(X_{mod} - X_{min} \right) + X_{min}^2 - X_{mod}^2 \right]}, 0 \le p \le P_1 \end{cases}$$

$$(1.22)$$

 $TrapezRight(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$. Трапецеидальное правое распределение значений параметра *x* - значения параметра находятся в интервале $X_{min} \div X_{max}$, а модальное значение находится в интервале $X_{min} \div X_{mod}$.

Переход трапецеидального распределения общего ОТ вида К (рис. 1.9) осуществляется трапецеидальному левому предельным перемещением левого интервального значения верхнего основания трапеции к минимальному значению $X_{mod1} \Rightarrow X_{min}$ с присвоением обозначения $X_{mod2} \equiv X_{mod}$. Проведенные математические расчеты показали, что этой трансформации соответствует предельный переход для плотности вероятности, интегральной и обратной функции вероятности:

$$TrapezRight(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}) = \lim_{\substack{X_{mod1} \to X_{min} \\ X_{mod2} \equiv X_{mod}}} Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max}).$$
(1.24)

Тогда, выполнив предельный переход, получим:

$$f_{TrapezRight}(x) = \begin{cases} 2/(X_{max} + X_{mod} - 2X_{min}), X_{min} \le x \le X_{mod}; \\ 2(X_{max} - x) \\ (X_{max} + X_{mod} - 2X_{min})(X_{max} - X_{mod}), \\ X_{mod} \le x \le X_{max}; u have 0. \end{cases}$$
(1.25)

$$F_{TrapezRight}(x) = \begin{cases} 2(x - X_{min})/(X_{max} + X_{mod} - 2X_{min}), \\ X_{min} \le x \le X_{mod}; 0, x < X_{min}; \\ 2X_{max}(x - X_{min}) - x^2 - X_{mod}(X_{mod} - 2X_{min}), \\ (X_{max} + X_{mod} - 2X_{min})(X_{max} - X_{mod}), \\ X_{mod} \le x \le X_{max}; 1, x > X_{max}. \end{cases}$$
(1.26)

$$G_{TrapezRight}(p) = \begin{cases} P_1 = 2(X_{mod} - X_{min})/(X_{max} + X_{mod} - 2X_{min}); \\ p(X_{max} + X_{mod})/2 + (1 - p)X_{min}, & 0 \le p \le P_1; \\ X_{max} - \sqrt{(1 - p)(X_{max} + X_{mod} - 2X_{min})(X_{max} - X_{mod}), \\ P_1 \le p \le 1. \end{cases}$$
(1.27)

Проведенные математические расчеты показали, что аналогичные трансформационные переходы справедливы также для треугольного и равномерного распределений (рис. 1.9). Причем эти подходы распространяются не только на плотности вероятности, интегральные и обратные функции вероятности, но и на их статистические характеристики - начальные и центральные моменты и производные от них. Визуализация трансформаций экспертных распределений на основе нечетких чисел применительно к плотности вероятности представлена на рис. 1.22. Для сопоставимости значений интервал задания для всех распределений соответствует 0÷1.

В завершение рассмотрим трансформации трапецеидального распределения при переходе к треугольному и равномерному распределениям.

Переход от трапецеидального распределения общего вида к треугольному (рис. 1.9) осуществляется последовательными предельными перемещениями интервальных значений верхнего основания трапеции к вершине треугольного распределения $X_{mod1} \Rightarrow X_{mod}$, $X_{mod2} \Rightarrow X_{mod}$ с присвоением последним обозначения X_{mod} .

$$Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max}) = \lim_{\substack{X_{mod1} \to X_{mod} \\ X_{mod2} \to X_{mod}}} Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max}).$$
(1.28)



Рисунок 1.22 - Трансформации экспертных распределений — аналогов нечетких чисел (на примере плотностей вероятности)

Переход от трапецеидального распределения общего вида к равномерному (рис. 1.9) осуществляется последовательными предельными перемещениями интервальных значений верхнего основания трапеции к интервальным значениям нижнего основания $X_{mod1} \Rightarrow X_{min}, X_{mod2} \Rightarrow X_{max}$.

$$Rand(x, X_{min}, X_{max}) = \lim_{\substack{X_{mod1} \to X_{min} \\ X_{mod2} \to X_{max}}} Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max}).$$
(1.29)

Проведенные аналитические расчеты соответствия плотностей, интегральных и обратных функций вероятностей, выполненные в рамках единой методологии, позволили получить систему зависимостей, обеспечивающих формирование случайных кусочно-непрерывных величин с заданными законами распределения.

Таким образом, можно считать доказанной гипотезу о возможности статистических трансформаций, аналогичных геометрическим, для трапецеидальных, треугольных и равномерного распределений.

Полученные расчетные зависимости необходимые, для формирования случайных величин, соответствующих экспертным распределениям - аналогам нечетких чисел, вошли составной частью в программное обеспечение системы рабочих статистического моделирования процессов интегрированных технологий, разрабатываемой на кафедре интегрированных технологий машиностроения им. М.Ф. Семко НТУ «Харьковский политехнический институт».

Примеры использования рассмотренных распределений при прогнозировании выходных показателей рабочих процессов в условиях различного уровня неопределенности значений технологических параметров (составляющие полного цикла и технологического времени создания изделий, характеристики 3D геометрии изделий, параметры лазерного луча и формообразования) приведены в [7, 25].

Заключение

Разработанная система статистического моделирования выходных характеристик рабочих процессов интегрированных технологий базируется на концепции статистического моделирования с реализацией в объектно-Работоспособность ориентированной среде программирования. системы определяется выполнением сформулированного в работе комплекса условий, необходимых для реалистического прогнозирования выходных показателей рабочих процессов в условиях различного уровня неопределенности значений технологических параметров. Реализация системы статистического моделирования рабочих процессов интегрированных технологий выполнена на

уровне готового программного продукта.

Теоретически обоснована и подтверждена модельными исследованиями методика перехода от экспертных оценок нечетких величин на базе семейств треугольных и трапецеидальных чисел к их вероятностным аналогам применительно к нечетко определенным технологическим параметрам. К ним законы распределения случайных следующие величин: 1 относятся треугольное общего вида $Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$; 2 - прямоугольное левое $TriangLeft(x, X_{min}, X_{max})$; 3 - прямоугольное правое $TriangRight(x, X_{min}, X_{max})$; 4 трапецеидальное распределение общего вида $Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$; 5 - трапецеидальное левое $TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$; 6 - трапецеидальное правое $TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$. Полученные кусочно-непрерывные зависимости для плотностей вероятности, интегральной и обратной функций частью вероятности вошли составной В систему статистического моделирования рабочих процессов интегрированных технологий.

Рассмотрены вопросы трансформаций семейств треугольных И трапецеидальных распределений. Выдвинута доказательная гипотеза 0 возможности статистических трансформаций, аналогичных геометрическим, трапецеидальных, треугольных И равномерного распределений. для Проведенные математические расчеты показали, что трансформационные предельные переходы справедливы для всех рассмотренных экспертных распределений. Причем эти подходы распространяются не только на плотности вероятности, интегральные и обратные функции вероятности, но и на их статистические характеристики - начальные и центральные моменты и производные от них.

Разработанная концепция статистического моделирования рабочих технологий интегрированных создает предпосылки процессов для прогнозирования выходных показателей рабочих процессов послойного (времени выращивания изделий полного цикла создания изделий, технологического времени их формообразования и структурных составляющих условиях различного уровня неопределенности процесса) В значений технологических параметров (составляющие полного цикла и технологического времени создания изделий, характеристики 3D геометрии изделий, параметры лазерного луча и формообразования).

Список литературы к разделу 1

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. - М.: Финансы и статистика, 1983. - 471 с.
- 2. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в

нечетких условиях: Монография. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2000. - 352 с.

- Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 488 с.
- 4. Бусленко Н.П., Голенко Д.И., Соболь И.М. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) М.: Физматгиз, 1962.
- 5. Гайсарян С.С. Объектно-ориентированные технологии проектирования прикладных программных систем // Центр Информационных Технологий. WEB: http://www.citmgu.ru.
- 6. Грабченко А.И., Доброскок В.Л. Статистический анализ законов распределения исследуемых 3D признаков при моделировании абразивно-алмазного инструмента // Резание И инструмент В технологических системах Межд. научн.-техн. сб. - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2001. Вып. 59. - С. 35-44.
- Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Абдурайимов Л.Н. Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - Вип. 1(12). - С. 3-16.
- Джекел П. Применение методов Монте-Карло в финансах: Пер. с англ. -М.: Интернет-трейдинг, 2004. - 256 с.
- 9. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология.
 М.: Машиностроение-1, 2004. 395 с.
- 10. Длин А.М. Математическая статистика в технике. М.: Советская наука, 1958. 466 с.
- 11. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1971. 328 с.
- Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. -М.: Наука, 1976. - 320 с.
- 13. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования И Монография: 2-e изготовления. ИЗД., перераб. доп. / И Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Верезуб Н.В., Доброскок В.Л., Кнут Х., Лиерат Ф. Витязев Ю.Б., / Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. - Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. - 224 с.
- 14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977. 832 с.

- 15. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике: Пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1982. 278 с.
- 16. Недосекин А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. Л.: Санкт-Петербург, 2002. 181 с.
- 17. Орлов А.И. Эконометрика: Учебник. М.: Экзамен, 2002. 576 с.
- Построение в условиях дефицита информации сводных оценок сложных систем / С.К. Колганов, В.В. Корников, П.Г. Попов, Н.В. Хованов. - М.: Радио и связь, 1994. - 80 с.
- 19. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. Харьков: ХГПУ, 1999. 436 с.
- 20. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган: Пер. с англ. - М.: Наука, 1979. - 832 с.
- 22. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под ред. А.И. Гаврилова. М.: Машиностроение, 1973. 567 с.
- 23. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1967. Т.2. 752 с.
- 24. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям: Пер. с англ. М.: Статистика, 1980. 95 с.
- 25. Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б., Гаращенко Я.Н. Обобщенная модель технологического времени генеративных технологий макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - Вип. 1(12). - С. 537-551.
- 26. Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Гаращенко Я.Н., Садовниченко Е.А. Формирование непрерывных случайных величин при статистическом моделировании рабочих процессов интегрированных технологий // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2006. - Вип. 2 (13). - С. 108-141.
- 27. Четвериков В.Н., Баканович Э.А., Меньков А.В. Вычислительная техника для статистического моделирования / Под ред. В.Н. Четверикова. М.: Советское радио, 1978. 312 с.
- Шлеер С., Меллор С. Объектно-ориентированный анализ: моделирование мира в состояниях: Пер. с англ. - К.: Диалектика, 1993. -240 с.
- 29. Fishman George S. Monte-Carlo: Concepts, algorithms and applications. New-York: Springer-Verlag, 1999. 722 p.
- Jackel P. Monte Carlo methods in finance. New York: John Wiley & Sons, 2002. - 232 p.
31. Zwillinger D., Kokoska S. Standard probability and Statistics tables and formulae. - London, New York: CHAPMAN & HALL CRC, 2000. - 537 p.

2. ФОРМИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ СТАТИСТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Введение

В настоящее время при решении прикладных задач все большее получают методы статистического (стохастического) применение моделирования [2, 4, 5, 9, 11, 16, 17, 18], синоним - метод Монте-Карло. Особый интерес представляет их использование для решения задач, связанных с прогнозированием результатов использования интегрированных технологий. в частности, рабочих процессов создания изделий методом послойного выращивания, когда выходные показатели процесса зависят от достаточно 10], большого количества параметров [6, связи между которыми инкапсулированы программном обеспечении компьютеризированного В оборудования.

Методы статистического моделирования (статистических испытаний) можно определить как методы решения математических задач и задач исследования сложных систем при помощи моделирования случайных реализаций и имитации случайных процессов, происходящих в сложных системах, с последующей оценкой их вероятностных характеристик [4, 16].

Чем сложнее решаемая задача, тем более эффективным оказывается применение метода статистических испытаний, а в некоторых случаях это единственный метод решения. Область применимости методов статистических испытаний принципиальных ограничений не имеет.

Построение и экспериментальная проверка модели обычно основаны на использовании априорной информации о природе и характере исследуемых соотношений и исходных статистических данных, характеризующих процесс и результат функционирования анализируемой системы.

Можно выделить следующие этапы статистического моделирования:

- Подготовка исходных данных (создание математической модели изучаемого объекта, задание входных переменных и выходных характеристик). Входные переменные могут быть как стохастическими (иметь заданный закон распределения, область задания и значения его параметров), так и детерминированными.
- Формирование выборок значений входных переменных и выходных характеристик (исследуемых признаков) в соответствии с принятой математической моделью и задачами исследования.
- Статистическая обработка результатов моделирования. В общем случае

она может иметь следующие составляющие: определение выборочных статистических характеристик исследуемых признаков (среднее арифметическое, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и пр.); корреляционный и регрессионный анализ исследуемых признаков; анализ результирующих распределений на предмет соответствия известным по критериям согласия; визуализация и протоколирование результатов.

Выбор метода формирование непрерывных случайных величин с заданным законом распределения во многом определяет эффективность статистического моделирования.

К основным методам формирования непрерывных случайных величин можно отнести метод обратной трансформации [17] (метод обратной функции [16]) и комбинационный (формирование любого воспроизводимого распределения с помощью распределений, формируемых более простыми средствами). В качестве исходных обычно используются равномерно распределенные случайные величины.

Метод обратной трансформации, получивший наиболее широкое распространение, заключается в следующем. Пусть непрерывная (или кусочнонепрерывная) случайная величина X задана плотностью $f_x(x)$ и интегральной

функцией вероятности $F_{X}(x) = \int_{-\infty}^{x} f_{X}(x) dx$. Взаимно-однозначная функция

 $G_X(p)$, полученная решением относительно *p* уравнения $F_X(x) = p$, преобразует равномерно распределенную в интервале (0, 1) случайную величину *p* в величину *X* с требуемой плотностью распределения вероятности $f_X(x)$.

Настояшая отработке общей работа посвящена методологии формирования непрерывных случайных величин для наиболее часто применяющихся законов распределения в теории вероятностей и прикладной статистике. Постановка задачи диктуется необходимостью создания системы статистического моделирования рабочих процессов интегрированных разрабатываемой на кафедре интегрированных технологий технологий, НТУ «Харьковский машиностроения им. М.Ф. Семко политехнический институт».

В качестве информационно-методической базы по законам распределений использовались следующие источники: [1, 3, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19].

В рамках единой методологии для 17 наиболее часто применяющихся

39

законов распределения были рассмотрены соответствия плотностей, интегральных и обратных функций вероятности с визуализацией примеров, а также статистические характеристики (в статье не представлены в связи с их значительным объемом). Расчеты выполнялись с использованием математического пакета Maple.

2.1. Равномерное (прямоугольное) распределение $Rand(X_{\min}, X_{\max})$

Случайная величина $Rand(X_{\min}, X_{\max})$ называется равномерно распределенной в интервале задания $X_{\min} \le x \le X_{\max}$, если ее плотность вероятности постоянна в этом интервале и равна нулю вне его [1] (в дальнейшем будем указывать - интервал задания).

Плотность вероятности равномерного распределения [17] (рис. 2.1):

$$f_{Rand}(x) = 1/(X_{max} - X_{min}), X_{min} \le x \le X_{max}; 0, uhave,$$
 (2.1)

где X_{\min}, X_{\max} - границы интервала задания; X_{\min} - параметр расположения, масштаб определяется величиной интервала задания $X_{\max} - X_{\min}$ ($X_{\min} < X_{\max}$).

Для Rand(0,1) в дальнейшем будем использовать обозначение *R* без указания параметров.

Интегральная функция вероятности равномерного распределения (рис. 2.2):

$$F_{Rand}(x) = \frac{x - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, X_{\min} \le x \le X_{\max}; 0, x < X_{\min}; 1, x > X_{\max}.$$
 (2.2)

Обратная функция вероятности равномерного распределения (рис. 2.3):

$$G_{Rand}(p) = X_{\min} + p(X_{\max} - X_{\min}), 0 \le p \le 1.$$
 (2.3)

Формирование случайных величин, имеющих равномерное распределение, производится методом обратной трансформации [17]:

$$Rand(X_{\min}, X_{\max}) = X_{\min} + R(X_{\max} - X_{\min}), \qquad (2.4)$$

где исходные значения R = Rand(0,1) генерируются специальными функциями в соответствии с особенностями используемой среды программирования. Так, например, (без учета дополнительных параметров) Visual FoxPro имеет функцию RAND(), возвращающую равномерно распределенное число с плавающей запятой в интервале 0...1; Maple - функцию rand(),



2.2. Нормальное распределение *Norm*(μ, σ)

Интервал задания $-\infty < x < +\infty$.

Плотность вероятности стандартного нормального распределения (рис. 2.4):

$$f_N(x) = f_{Norm}(x, 0, 1) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$$
 (2.5)

Плотность нормального распределения и его взаимосвязь со стандартным (для Norm(0,1) в дальнейшем будем использовать обозначение N без указания параметров) определяются следующими зависимостями [8, 12]:

$$f_{Norm}(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] = \mu + \sigma f_N(x) = \frac{1}{\sigma} f_N\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \quad (2.6)$$

где μ - математическое ожидание; σ - среднеквадратическое отклонение ($\sigma > 0$).

Интегральная функция вероятности стандартного нормального распределения определяется через специальные функции [13, 18]:

$$F_{N}(x) = \int_{-\infty}^{x} f_{N}(x) dx = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}x\right) \right] = \frac{1}{2} + \Phi(x), \quad (2.7)$$

где erf(z) - функция ошибки (является базовой функцией математических пакетов Maple и Mathcad); $\Phi(z)$ - функция Лапласа:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{z} e^{-t^{2}} dt; \Phi(z) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{0}^{z} e^{-t^{2}/2} dt; \operatorname{erf}(z) = 2\Phi(\sqrt{2}z). \quad (2.8)$$

Переход к интегральной функции вероятности нормального распределения (рис. 2.5) производится по следующим зависимостям:

$$F_{Norm}\left(x\right) = F_{N}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right] = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right).$$
(2.9)

Обратная функция вероятности не имеет аналитического выражения, поэтому графики (рис. 2.6) строились по результатам численных расчетов.

Формирование случайных величин, имеющих стандартное нормальное распределение, целесообразно производить Box-Muller методом [18]. Две независимые нормальные случайные величины N_1 , N_2 можно получить из двух



независимых равномерно распределенных случайных величин R_1, R_2 с помощью соотношений:

$$N_1 = \sqrt{-2\ln R_1} \sin(2\pi R_2); N_2 = \sqrt{-2\ln R_1} \cos(2\pi R_2).$$
(2.10)

С учетом масштабируемости нормального распределения можно получить значения для его общего вида [17]:

$$Norm(\mu,\sigma) = \mu + \sigma N; 0 < \sigma.$$
(2.11)

2.3. Логарифмически нормальное распределение $NormLn(\mu, \sigma)$

Интервал задания $0 < x < +\infty$.

Плотность вероятности логарифмически нормального распределения (рис. 2.7) связана с нормальным распределением логарифмическим преобразованием аргумента [8, 17]:

$$f_{NormLn}\left(x\right) = \frac{1}{x} f_{Norm}\left(\ln x\right) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\cdot\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad (2.12)$$

где μ , σ - коэффициенты ($\sigma > 0$).

Интегральная функция вероятности логарифмически нормального распределения (рис. 2.8) с учетом (2.9), (2.12) определяется по следующей зависимости:

$$F_{NormLn}(x,\mu,\sigma) = F_{Norm}(\ln x,\mu,\sigma) = F_N\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right).$$
 (2.13)

Обратная функция вероятности не имеет аналитического выражения, поэтому графики (рис. 2.9) строились по результатам численных расчетов.

Формирование случайных величин, имеющих логарифмически нормальное распределение, производится функциональной трансформацией величин, имеющих нормальное распределение (2.11) [17]:

$$NormLn(\mu, \sigma) = \exp[Norm(\mu, \sigma)].$$
(2.14)

2.4. Распределение Вейбулла Weibull(b,c)

Интервал задания $0 < x < +\infty$.

Плотность вероятности [15, 17, 18, 19] (рис. 2.10):





$$f_{Weibull}\left(x,b,c\right) = \frac{c x^{c-1}}{b^c} \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^c\right]; 0 \le x < \infty, 0 \text{ иначе}, \qquad (2.15)$$

где *b* - параметр масштаба (*b* > 0); *c* - параметр формы (c > 0). Интегральная функция вероятности [15, 18] (рис. 2.11):

$$F_{Weibull}(x) = 1 - \exp\left[-(x/b)^c\right], 0 \le x < \infty; 0, u \text{ Have.}$$

$$(2.16)$$

Обратная функция вероятности [17] (рис. 2.12):

$$G_{Weibull}\left(p\right) = b\left[-\ln\left(1-p\right)\right]^{\frac{1}{c}}.$$
(2.17)

Необходимо отметить, что в формуле обратной функции вероятности в [15] описка.

Формирование случайных величин, имеющих распределение Вейбулла, производится методом обратной трансформации:

$$Weibull(b,c) = b \left[-\ln(1-R) \right]^{\frac{1}{c}}, \qquad (2.18)$$

где R – равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

2.5 Экспоненциальное распределение Exp(b)

Интервал задания $0 \le x < +\infty$. Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла: Exp(b) = Weibull(b, c = 1).

Плотность вероятности [15, 17] (рис. 2.13):

$$f_{Exp}(x,b) = \frac{1}{b} \cdot \exp\left(-\frac{x}{b}\right), 0 \le x; 0 \text{ иначе}, \qquad (2.19)$$

где b – математическое ожидание (b > 0).

Интегральная функция вероятности [15] (рис. 2.14):

$$F_{Exp}(x) = 1 - \exp(-x/b), 0 \le x; 0, u \text{ Have}.$$
(2.20)

Обратная функция вероятности [17] (рис. 2.15):

$$G_{Exp}(p) = -b \ln(1-p).$$
 (2.21)

Необходимо отметить, что в формуле обратной функции вероятности [15] описка.

Формирование случайных величин имеющих экспоненциальное распределение производится методом обратной трансформации:





$$Exp(b) = -b\ln(1-R), \qquad (2.22)$$

где R - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

2.6. Логистическое распределение Logist(a,k)

Интервал задания $-\infty < x < +\infty$.

Плотность вероятности [15, 17, 19] (рис. 2.16):

$$f_{Logist}(x) = \exp[(x-a)/k]/k \left\{1 + \exp[(x-a)/k]\right\}^2, \qquad (2.23)$$

где a - параметр расположения; k - масштаба (k > 0).

Интегральная функция вероятности [15] (рис. 2.17):

$$F_{Logist}(x) = 1 - \left\{1 + \exp[(x-a)/k]\right\}^{-1}.$$
 (2.24)

Обратная функция вероятности [15, 17] (рис. 2.18):

$$G_{Logist}(p) = a + k \ln[p/(1-p)], 0
(2.25)$$

Формирование случайных величин имеющих логистическое распределение производится методом обратной трансформации:

$$Logist(a,k) = a + k \ln[R/(1-R)], \qquad (2.26)$$

где *R* - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

2.7. Распределение Парето Pareto(c)

Интервал задания $1 \le x < +\infty$. Плотность вероятности [15, 18] (рис. 2.19):

$$f_{Pareto}(x) = c/x^{c+1}, 1 \le x < \infty; 0, u \text{ Have}.$$
 (2.27)

Интегральная функция вероятности [15, 18] (рис. 2.20):

$$F_{Pareto}(x) = 1 - 1/x^{c}$$
 (2.28)

Обратная функция вероятности [15] (рис. 2.21):

$$G_{Pareto}(p) = [1/(1-p)]^{1/c}.$$
 (2.29)

Формирование случайных величин, имеющих распределение Парето, производится методом обратной трансформации:



$$Pareto(c) = \left[\frac{1}{(1-R)}\right]^{1/c}, \qquad (2.30)$$

где R - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

2.8. Степенное распределение Power(c)

Интервал задания $0 \le x \le 1$.

Плотность вероятности [15] (рис. 2.22):

$$f_{Power}(x,c) = c x^{c-1}, 0 \le x \le 1; 0, u have,$$
(2.31)

где c - параметр формы (c > 0).

Интегральная функция вероятности [15] (рис. 2.23):

$$F_{Power}(x) = x^{c}, 0 \le x \le 1; 0, x < 0; 1, x > 1.$$
(2.32)

Обратная функция вероятности [15] (рис. 2.24):

$$G_{Power}(p) = p^{1/c}, 0 \le p \le 1.$$
 (2.33)

Формирование случайных величин, имеющих степенное распределение, производится методом обратной трансформации:

$$Power(c) = R^{1/c}, \qquad (2.34)$$

где *R* - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

2.9. Распределение по закону арксинуса ArcSin(a, l)

Интервал задания $a - l \le x \le a + l$, где a, l - параметры. Плотность вероятности [13] (рис. 2.25):

$$f_{ArcSin}(x) = 1 / \pi \cdot \sqrt{l^2 - (x - a)^2}, |x - a| \le l; 0, u ha 4e, \qquad (2.35)$$

где a - параметр расположения; l - параметр масштаба (l > 0).

Интегральная функция вероятности (рис. 2.26):

$$F_{ArcSin}(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{x-a}{l}\right), a-l \le x \le a; 0, x < a-l; 1, x > a+l. \quad (2.36)$$

Необходимо отметить, что в формуле интегральной функции вероятности [13] описка.

Обратная функция вероятности (рис. 2.27):

$$G_{ArcSin}(p) = a - l\cos(\pi p), 0 \le p \le 1.$$
 (2.37)

52



Формирование случайных величин, имеющих распределение по закону арксинуса, производится методом обратной трансформации:

$$\operatorname{ArcSin}(a,l) = a - l\cos(\pi R), \qquad (2.38)$$

где *R* - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

2.10. Треугольное распределение Симпсона Simpson(a, l)

Распределение Симпсона (распределение по равнобедренному треугольнику) [13] возникает при сложении двух независимых случайных величин, имеющих равномерный закон распределения с одинаковыми параметрами:

$$Simpson(a,l) \sim Rand(X_{\min}, X_{\max}) + Rand(X_{\min}, X_{\max}).$$
(2.39)

Интервал задания $2X_{\min} = a - l \le x \le a + l = 2X_{\max}$, где a, l - параметры распределения Симпсона; X_{\min}, X_{\max} - исходных равномерных распределений. Взаимосвязь параметров определяется следующими зависимостями:

$$a = X_{\min} + X_{\max}; \ l = X_{\max} - X_{\min}.$$
 (2.40)

Плотность вероятности (рис. 2.28):

$$f_{Simpson}(x) = \begin{cases} (x-a+l)/l^2, & a-l \le x \le a; \\ (a+l-x)/l^2, & a \le x \le a+l; 0, u \text{ Have.} \end{cases}$$
(2.41)

Необходимо отметить, что в формуле плотности вероятности [13] описка. Интегральная функция вероятности [13] (рис. 2.29):

$$F_{Simpson}(x) = \begin{cases} \left[(x-a+l)/l \right]^2 / 2a, & a-l \le x \le a; 0, x < a-l; \\ 1 - \left[(a+l-x)/l \right]^2 / 2a, & a \le x \le a+l; 1, x > a+l. \end{cases}$$
(2.42)

Обратная функция вероятности (рис. 2.30):

$$G_{Simpson}(p) = \begin{cases} a - l(1 - \sqrt{2p}), & 0 \le p \le 1/2; \\ a + l[1 - \sqrt{2(1-p)}], & 1/2 \le p \le 1. \end{cases}$$
(2.43)

Формирование случайных величин, имеющих распределение Симпсона, можно производить методом обратной трансформации:

$$Simpson(a, l) = G_{Simpson}(p = R), \qquad (2.44)$$

54



где *R* - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

Альтернативным вариантом формирования является сложение двух независимых случайных величин, имеющих равномерный закон распределения с одинаковыми параметрами:

$$Simpson(a,l) \sim Rand_1(X_{\min}, X_{\max}) + Rand_2(X_{\min}, X_{\max}), \qquad (2.45)$$

где *Rand*₁, *Rand*₂ формируются по зависимости (2.4), а их параметры, с учетом (2.40) определяются следующим образом:

$$X_{\min} = (a-l)/2; \ X_{\max} = (a+l)/2.$$
 (2.46)

2.11. Трапецеидальное распределение Симпсона Simpson2(a,l,b)

Трапецеидальное распределение Симпсона (распределение по равнобочной трапеции) [13] возникает при сложении двух независимых случайных величин, имеющих равномерные законы распределения с различающимися параметрами:

Simpson2(a,l,b) ~ Rand(
$$X_{\min 1}, X_{\max 1}$$
) + Rand($X_{\min 2}, X_{\max 2}$). (2.47)

Интервал задания $X_{\min 1} + X_{\min 2} = a - l \le x \le a + l = X_{\max 1} + X_{\max 2}$, где a, l - параметры распределения Симпсона; $X_{\min 1}, X_{\max 1}, X_{\min 2}, X_{\max 2}$ - исходных равномерных распределений. Взаимосвязь параметров определяется системой зависимостей:

$$a = \left(X_{\min 1} + X_{\max 1} + X_{\min 2} + X_{\max 2}\right) / 2; \qquad (2.48)$$

$$l = \left(X_{\max 1} - X_{\min 1} + X_{\max 2} - X_{\min 2}\right) / 2; \qquad (2.49)$$

$$b = \left| X_{\max 1} - X_{\min 1} - X_{\max 2} + X_{\min 2} \right| / 2.$$
 (2.50)

Плотность вероятности (рис. 2.31):

$$f_{\text{Simpson2}}(x) = \begin{cases} (x-a+l)/(l^2-b^2), & a-l \le x \le a-b; \\ 1/(l+b), & a-b \le x \le a+b; \\ (a+l-x)/(l^2-b^2), & a+b \le x \le a+l; 0, u \text{ Have}, \end{cases}$$
(2.51)

где *а* - математическое ожидание (координата оси симметрии трапеции); *l*, *b* - соответственно нижнее и вернее основания трапеции.



Интегральная функция вероятности (рис. 2.32):

$$F_{\text{Simpson2}}(x) = \begin{cases} \left(x-a+l\right)^2 / 2\left(l^2-b^2\right), & a-l \le x \le a-b; 0, x < a-l; \\ \left[2(x-a)+l+b\right] / 2\left(l+b\right), & a-b \le x \le a+b; \\ 1-\left[\left(a+l-x\right)^2 / 2\left(l^2-b^2\right)\right], & a+b \le x \le a+l; 1, x > a+l. \end{cases}$$
(2.52)

Обратная функция вероятности (рис. 2.33):

$$G_{\text{Simpson2}}(p) = \begin{cases} a \cdot l + \sqrt{2 p (l^2 \cdot b^2)}, & 0 \le p \le (l \cdot b)/2 (l + b); \\ p (l + b) + a \cdot (l + b)/2, & (l \cdot b)/2 (l + b) \le p \le (l + 3b)/2 (l + b); \\ a + l \cdot \sqrt{2 (1 \cdot p) (l^2 \cdot b^2)}, & (l + 3b)/2 (l + b) \le p \le 1. \end{cases}$$

Формирование случайных величин, имеющих распределение Симпсона, можно производить методом обратной трансформации:

$$Simpson2(a,l,b) = G_{Simpson2}(p=R), \qquad (2.54)$$

где R - равномерно распределенные (0...1) случайные числа.

Альтернативным вариантом формирования является сложение двух независимых случайных величин, имеющих равномерный закон распределения с различающимися параметрами:

$$Simpson(a,l,b) \sim Rand_1(X_{\min 1}, X_{\max 1}) + Rand_2(X_{\min 2}, X_{\max 2}), \qquad (2.55)$$

где *Rand*₁, *Rand*₂ формируются по зависимости (2.4), а совокупность множества вариантов сочетаний значений их параметров определяется решением системы уравнений (2.48) - (2.50):

$$X_{\max 1} = X_{\min 1} + l \mp b; X_{\min 2} = a - l - X_{\min 1}; X_{\max 2} = a \pm b - X_{\min 1}, \quad (2.56)$$

где верхний знак соответствует условию положительного значения под знаком модуля (2.50) $X_{\max 1} - X_{\min 1} - X_{\max 2} + X_{\min 2} > 0$.

2.12. Распределение Релея $Relay(\sigma)$

Закон Релея [13] применяется для описания неотрицательных величин, когда случайная величина является геометрической суммой двух независимых случайных нормально распределенных величин с нулевыми математическими ожиданиями ($\mu_1 = \mu_2 = 0$) и одинаковыми среднеквадратическими отклонениями ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$):



$$Relay(\sigma) \sim \sqrt{Norm^2(0,\sigma) + Norm^2(0,\sigma)}.$$
 (2.57)

Интервал задания $0 \le x < +\infty$.

Плотность вероятности [13, 19] (рис. 2.34):

$$f_{Relay}(x) = (x/\sigma^2) \exp(-x^2/2\sigma^2), 0 \le x < \infty; 0 \text{ иначе},$$
(2.58)

где σ - параметр формы ($\sigma > 0$).

Интегральная функция вероятности [13] (рис. 2.35):

$$F_{Relay}(x) = 1 - \exp(-x^2/2\sigma^2), 0 \le x < \infty; 0, u \text{ Have.}$$
(2.59)

Обратная функция вероятности (рис. 2.36):

$$G_{Rellay}(p) = \sqrt{2} \sigma \sqrt{-\ln(1-p)}, 0 \le p < 1.$$
 (2.60)

Формирование случайных величин, имеющих распределение Релея, можно производить методом обратной трансформации:

$$Raley(\sigma) = G_{Rellay}(p = R).$$
(2.61)

где *R* - равномерно распределенные (0...1) случайные числа (с отбрасыванием значений равных 1).

Альтернативным вариантом формирования является геометрическое сложение двух независимых случайных величин, имеющих нормальный закон распределения $Norm(0, \sigma)$ с одинаковыми параметрами:

$$Relay(\sigma) \sim \sqrt{\left[Norm_1(0,\sigma)\right]^2 + \left[Norm_2(0,\sigma)\right]^2}, \qquad (2.62)$$

где Norm₁, Norm₂ формируются по зависимости (2.11).

2.13. Распределение Максвелла $Maxwell(\sigma)$

Закон Максвелла [13] применяется для описания неотрицательных величин, когда случайная величина является геометрической суммой трех независимых случайных нормально распределенных величин с нулевыми математическими ожиданиями ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$) и одинаковыми среднеквадратическими отклонениями ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$):

$$Maxwell(\sigma) \sim \sqrt{Norm^2(0,\sigma) + Norm^2(0,\sigma) + Norm^2(0,\sigma)}.$$
 (2.63)

Интервал задания $0 \le x < +\infty$.



Плотность вероятности [13] (рис. 2.37):

$$f_{Maxwell}\left(x\right) = \frac{x^2}{\sigma^3} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), 0 \le x < \infty; 0, u \text{ Have}, \qquad (2.64)$$

где σ - параметр формы ($\sigma > 0$).

Интегральная функция вероятности [13] (рис. 2.38):

$$F_{Maxwell}\left(x,\sigma\right) = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \frac{x}{\sigma}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}\frac{x^{2}}{\sigma^{2}}\right) = 2\Phi\left(\frac{x}{\sigma}\right) - \frac{x}{\sigma}f_{N}\left(\frac{x}{\sigma}\right), \quad (2.65)$$

где erf (z)- функция ошибки (2.8); $\Phi(z)$ - функция Лапласа (2.8); $f_N(z)$ плотность вероятности стандартного нормального распределения (2.5).

Необходимо отметить, что в формуле интегральной функции вероятности [13] описка.

Обратная функция вероятности не имеет аналитического выражения, поэтому графики строились по численным расчетам (рис. 2.39).

Формирование случайных величин, имеющих распределение Максвелла, производится геометрическим сложением трех независимых случайных величин, имеющих нормальный закон распределения $Norm(0,\sigma)$ с одинаковыми параметрами:

$$Maxwell(\sigma) \sim \sqrt{\left[Norm_1(0,\sigma)\right]^2 + \left[Norm_2(0,\sigma)\right]^2 + \left[Norm_3(0,\sigma)\right]^2}, (2.66)$$

где Norm₁, Norm₂, Norm₃ формируются по зависимости (2.11).

2.14. Распределение Эрланга Erlang(b,c)

Распределение Эрланга - это гамма-распределение с целым параметром *с* [15].

Интервал задания $0 \le x < +\infty$.

Плотность вероятности [15, 19] (рис. 2.40):

$$f_{Erlang}\left(x\right) = \frac{1}{b \cdot (c-1)!} \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \cdot \exp\left(-\frac{x}{b}\right), 0 \le x; 0, uhave, \qquad (2.67)$$

где *b* - параметр масштаба (*b* > 0); *c* - параметр формы (положительное целое число).

Интегральная функция вероятности [15] (рис. 2.41):



$$F_{Erlang}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{b}\right) \sum_{i=0}^{c-1} \frac{(x/b)^{i}}{i!}, x > 0; 0 \text{ иначе.}$$
(2.68)

Обратная функция вероятности не имеет аналитического выражения, поэтому графики строились по численным расчетам (рис. 2.42).

Формирование случайных величин, имеющих распределение Эрланга, производится по следующей зависимости:

$$Erlang(b,c) = -b\ln\left(\prod_{i=1}^{c} R_i\right); b > 0, c \ge 1,$$
(2.69)

где R_i - равномерно распределенные (0...1) независимые случайные числа.

2.15. Бета-распределение Beta(v, w, b)

Интервал задания $0 \le x \le b$.

Плотность вероятности [15] (рис. 2.43):

$$f_{Beta}(x) = (x/b)^{v-1} [1 - (x/b)]^{w-1} / b B(v,w), \qquad (2.70)$$

где B(v, w)- бета-функция; v, w - параметры формы (v > 0, w > 0); b - параметр масштаба (b > 0).

Бета-функция определяется и выражается через гамма-функцию следующим образом [15]:

$$B(v,w) = \int_{0}^{1} u^{v-1} (1-u)^{w-1} du = \Gamma(v) \Gamma(w) / \Gamma(v+w).$$
 (2.71)

Гамма-функция определяется выражениями:

$$\Gamma(c) = \int_{0}^{\infty} \exp(-u) u^{c-1} du; \ \Gamma(n) = (n-1)!, \qquad (2.72)$$

где *с* - параметр (c > 0); *n* - целочисленный параметр (n > 0).

В системе Maple гамма-функции соответствует функция GAMMA(z), бета-функции — Beta(v, w).

Интегральная (рис. 2.44) и обратная функции вероятности (рис. 2.45) не имеют аналитического выражения, поэтому их графики строились по численным расчетам.

Формирование случайных величин, имеющих бета-распределение, рассмотрим только для целочисленных значений параметров *v*, *w* (более сложные варианты рассмотрены в [17]).



Если *v* и *w* - целые числа ($v, w \ge 1$), то случайные числа Beta(v, w, b)можно получить из случайных чисел, соответствующих независимым случайным величинам, имеющим распределения Эрланга: Erlang(1, v), Erlang(1, w); с учетом [15]:

$$Beta(v,w,b) = b \, Erlang(1,v) / \left[Erlang(1,v) + Erlang(1,w) \right], \qquad (2.73)$$

где Erlang(1,v), Erlang(1,w) формируются в соответствии с (2.69); *b* - параметр масштаба.

2.16. Распределение хи-квадрат $\chi^2(v)$

Интервал задания $0 \le x < +\infty$.

Плотность вероятности [15] (рис. 2.46):

$$f_{\chi^{2}}(x) = \frac{x^{(\nu-2)/2} \exp(-x/2)}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)}, 0 \le x; 0, u have, \qquad (2.74)$$

где *v* - число степеней свободы (положительное целое число).

Интегральная (рис. 2.47) и обратная функции вероятности (рис. 2.48) не имеют аналитического выражения, поэтому их графики строились по численным расчетам.

Формирование случайных величин, имеющих распределение хи-квадрат с *v* степенями свободы, может производиться из независимых случайных величин, имеющих стандартное нормальное распределение [12]:

$$\chi^{2}(v) = \sum_{i=1}^{v} (N_{i})^{2}, \qquad (2.75)$$

где N = Norm(0,1) - формируются по зависимостям (2.10).

2.17. F-распределение F(v, w)

Интервал задания $0 \le x < +\infty$.

Плотность вероятности [15] (рис. 2.49):

$$f_F(x) = \frac{\Gamma[(v+w)/2](v/w)^{v/2} x^{(v-2)/2}}{\Gamma(v/2)\Gamma(w/2)[1+(v/w)x]^{(v+w)/2}}, 0 \le x; 0, u \text{ Have}, \qquad (2.76)$$

где *v*, *w* - количества степеней свободы (положительные целые числа).

Интегральная (рис. 2.50) и обратная функции вероятности (рис. 2.51) не





имеют аналитического выражения, поэтому их графики строились по численным расчетам.

Формирование случайных величин, имеющих *F*-распределение с *v*, *w* степенями свободы, может производиться из независимых случайных величин, имеющих хи-квадрат распределение [15]:

$$F(v,w) = \left[\chi^2(v)/v\right] / \left[\chi^2(w)/w\right], \qquad (2.77)$$

где $\chi^2(z)$ величины формируются по зависимости (2.75).

Заключение



заданными законами распределения.

По результатам проведенных исследований разработана общая схема формирования случайных величин для 17 наиболее часто применяющихся законов распределения (рис. 2.52).

Проведенные аналитические расчеты соответствия плотностей, интегральных и обратных функций вероятностей, выполненные в рамках единой методологии, позволили получить систему зависимостей, обеспечивающих формирование непрерывных случайных величин с заданными законами распределения.

Рассмотренные способы формирования случайных величин вошли составной частью в программное обеспечение системы статистического моделирования рабочих процессов интегрированных технологий, разрабатываемой на кафедре интегрированных технологий машиностроения им. М.Ф. Семко НТУ «Харьковский политехнический институт».

Список литературы к разделу 2

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. - М.: Финансы и статистика, 1983. - 471 с.
- Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 488 с. З. Длин А.М. Математическая статистика в технике. - М.: Изд-во "Советская наука", 1958. - 466 с.
- 4. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1971. 328 с.
- 5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1976. 320 с.
- 6. 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. Товажнянского Л.Л., Грабченко А.И. - Х.: ОАО "Модель Вселенной", 2005. - 224 с.
- 7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
- 8. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике: Пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1982. 278 с.
- Построение в условиях дефицита информации сводных оценок сложных систем / С.К. Колганов, В.В.Корников, П.Г. Попов, Н.В. Хованов. - М.: Радио и связь, 1994. - 80 с.
- 10. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. Харьков: ХГПУ, 1999. 436 с.

- 11. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
- 12. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган: Пер. с англ. М.: Наука, 1979. 832 с.
- 13. Точность производства в машиностроении и приборостроении / Под ред. А.И. Гаврилова. М.: Машиностроение, 1973. 567 с.
- 14. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1967. Т.2. 752 с.
- 15. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям: Пер. с англ. М.: Статистика, 1980. 95 с.
- 16. Четвериков В.Н., Баканович Э.А., Меньков А.В. Вычислительная техника для статистического моделирования / Под ред. В.Н. Четверикова. - М.: Советское радио, 1978. - 312 с.
- 17. Fishman George S. Monte-Carlo: Concepts, algorithms and applications. -New-York: Springer-Verlag, 1999. - 722 p.
- 18. Jackel P. Monte Carlo methods in finance. New York: John Wiley & Sons, 2002. 232 p.
- 19. Zwillinger D., Kokoska S. Standard probability and Statistics tables and formulae. London, New York: CHAPMAN & HALL CRC, 2000. 537 p.

3. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ГЕНЕРАТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ МАКРОУРОВНЯ

Введение

Рассмотрен комплекс вопросов статистического прогнозирования при анализе временных цепей полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня. Представлены результаты разработки обобщенной стохастической модели продолжительности полного цикла создания изделий по интегрированным компьютеризированным генеративным технологиям применительно к лазерной стереолитографии (SLA) и селективному лазерному спеканию (SLS).

3.1. Цикл создания изделий генеративными технологиями макроуровня

Цикл создания изделий T_{Σ} генеративными технологиями макроуровня можно представить в виде линейной последовательности периодов:

$$T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3}, \qquad (3.1)$$

где *Т*_{3D mod} - время создания электронных 3D моделей изделий;

T_{Form} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания);

*Т*_{*PP1*}, *Т*_{*PP2*}, *Т*_{*PP3*} - времена различных этапов постобработки.

Применительно к технологиям лазерной стереолитографии (SLA) и избирательного лазерного спекания (SLS) могут использоваться следующие постпроцессы:

- *Т*_{*PP*1} постпроцесс № 1: SLA окончательная фотополимеризация изделия в специальной ультрафиолетовой камере мод. PCA 500; SLS - очистка изделий от остаточного порошка;
- T_{PP2} постпроцесс $\mathbb{N}_{\mathbb{P}} 2$: SLA - выдержка изделия в специальном термошкафу (для температуры низкотемпературном повышения плавления полимера); SLS - выжигание полимера, спекание основного материала и инфильтрация оловянистой бронзы при использовании инкапсулированных полимер частиц металлических В порошков (нержавеющая или углеродистая сталь);
- *T*_{*PP3*} постпроцесс № 3 (слесарная шлифовка, полировка, окраска и пр.). В каждом периоде имеет место процедура эволюции изделия и на каждом
ее этапе достигается определенный эволюционный результат:

*T*_{3D mod} - файл (или система файлов) триангуляционного описания 3D моделей изделий (в STL-формате);

 T_{Form} - послойная материализация 3D моделей, т. е. прямой переход от электронного образа изделия в твердотельное состояние;

*T*_{*PP1*}, *T*_{*PP2*}, *T*_{*PP3*} - придание изделиям требуемых эксплуатационных свойств и необходимого потребительского качества.

3.2 Понятие временных цепей

Таким образом, цикл изделий интегрированными создания генеративными технологиями макроуровня состоит из ряда закономерно расположенных И находящихся BO взаимосвязи периодов (звеньев), представляющих временную цепь. Понятие временных цепей по аналогии с размерными цепями при решении технологических задач введено Б.М. Базровым [3].

Основные термины, обозначения и определения размерных цепей определяются ГОСТ 16319-80, а методы расчета - ГОСТ 16320-80. При расчете размерных цепей могут решаться прямая или обратная задачи. В первом случае по установленным требованиям к замыкающему звену определяются параметры всех звеньев, составляющих размерную цепь. При решении обратной задачи по параметрам составляющих звеньев определяются характеристики замыкающего звена [7].

В размерных цепях, в которых должна быть обеспечена полная взаимозаменяемость, допуски рассчитываются методом максимума-минимума. При этом учитываются только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания.

Размерные цепи, для которых экономически оправдан риск возможного выхода за пределы поля допуска замыкающих звеньев у части изделий, рассчитываются вероятностным методом. При этом учитывается рассеяние размеров и вероятность различных сочетаний отклонений составляющих звеньев размерной цепи [4, 7, 10].

На основе аналогии с размерными цепями применительно к временным цепям создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня введем следующие определения:

• Временная цепь - совокупность периодов времени, в рамках которых непосредственно решается поставленная задача. Они образуют замкнутый контур. Периоды времени, образующие временную цепь, можно определить как звенья временной цепи. Одно звено во временной цепи является замыкающим (исходным), а остальные - составляющими;

- Замыкающим (исходным) звеном временной цепи будем называть звено, оказывающееся последним или первым (исходным) при ее построении.
- Составляющим звеном временной цепи будем называть звено, функционально связанное с замыкающим звеном. Составляющие звенья, В зависимости от ИХ влияния на замыкающее звено, бывают увеличивающими или уменьшающими.
- Увеличивающим звеном временной цепи называется такое, при увеличении которого замыкающее звено увеличивается.
- Уменьшающим звеном временной цепи называется такое, при увеличении которого замыкающее звено уменьшается.
- Компенсирующее звено временной цепи звено, за счет изменения величины которого достигаются требуемые временные характеристики замыкающего звена.

• Основная временная цепь - цепь, замыкающим звеном которой является общее время выполнения поставленной задачи.

 Производная временная цепь - цепь, замыкающим звеном которой является одно из составляющих звеньев основной временной цепи. Построение и расчет производной временной цепи раскрывает вероятностное содержание составляющего звена основной временной цепи.

Применительно к временным цепям создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня имеет смысл ввести определения прямой и обратной задач расчета, отличные от принятых в размерных цепях:

- Прямая задача определение времени полного цикла создания изделий генеративными технологиями макроуровня путем суммирования временных периодов всех составляющих звеньев. Структурное расчетное выражение для этого случая соответствует (3.1);
- Обратная задача определение одного из временных периодов составляющих звеньев при известном времени полного цикла создания изделий и прочих составляющих звеньев.

Решение обратной задачи временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня распадается на 5 вариантов в соответствии с количеством исходных составляющих звеньев:

$$T_{3Dmod} = T_{\Sigma} - (T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3});$$
(3.2)

$$T_{Form} = T_{\Sigma} - \left(T_{3Dmod} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3}\right);$$
(3.3)

74

$$T_{PP1} = T_{\Sigma} - \left(T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP2} + T_{PP3}\right);$$
(3.4)

$$T_{PP2} = T_{\Sigma} - \left(T_{3D\,mod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP3}\right); \tag{3.5}$$

$$T_{PP3} = T_{\Sigma} - \left(T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2}\right), \qquad (3.6)$$

где *T*_Σ - полного цикла создания изделий;

*T*_{3D mod} - время создания электронных 3D моделей изделий;

T_{Form} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания);

*Т*_{*PP1*}, *Т*_{*PP2*}, *Т*_{*PP3*} - времена различных этапов постобработки.

3.3. Основные особенности временных цепей

Основной особенностью временных изделий цепей создания интегрированными генеративными технологиями макроуровня является высокий уровень неопределенности значений составляющих звеньев. Это связано с большим числом факторов, влияние которых практически учесть не представляется возможным. Таким образом, попытки использования только детерминированного подхода обречены на неудачу. Одним из перспективных современных подходов к решению задач при системной неопределенности исходных данных является использование нечетких экспертных оценок на базе интервальных, треугольных, трапециевидных и др. чисел [2, 9, 11, 12]. К ним законы распределения случайных 1 относятся следующие величин: треугольное общего вида $Triang(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$; 2 - прямоугольное левое $TriangLeft(x, X_{min}, X_{max}); 3$ - прямоугольное правое $TriangRight(x, X_{min}, X_{max}); 4$ трапецеидальное распределение общего вида $Trapez(x, X_{min}, X_{mod1}, X_{mod2}, X_{max})$; 5 - трапецеидальное левое $TrapezLeft(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$; 6 - трапецеидальное правое $TrapezRight(x, X_{min}, X_{mod}, X_{max})$.

В процессе исследований была выявлена возможность статистических трансформаций (аналогичных геометрическим) для трапецеидальных, треугольных и равномерного распределений. Взаимосвязь и трансформации семейств трапецеидальных и треугольных распределений представлены на рис. 3.1.

3.4. Расчет временных цепей методом статистического прогнозирования

В настоящей работе предлагается расчет временных цепей производить методом статистического прогнозирования [1, 5, 6, 8]. Предлагаемый метод



объединяет в себе возможности как полной, так и неполной взаимозаменяемости с оценкой доверительной вероятности нахождения значений замыкающего звена в заданном интервале или риска выхода за его границы.

Метод полной взаимозаменяемости (метод максимума-минимума или интервальный метод) учитывает возможность сочетания крайних значений составляющих звеньев, что приводит к завышенным интервальным оценкам замыкающего звена. Считается, что экономически оправданной областью использования метода полной взаимозаменяемости являются малозвенные размерные цепи и размерные цепи с относительно широким полем допуска замыкающего звена. Низкая вероятность сочетания во временной цепи крайних отклонений составляющих звеньев приводит к целесообразности использования статистического метода расчета.

Сущность статистического метода заключается в том, что требуемая область значений замыкающего звена достигается с некоторым риском выхода за допустимые границы. Однако этот риск позволяет расширить области допустимых значений составляющих звеньев в сравнении с их значениями, установленными методом интервальных оценок. Эта возможность создается малой вероятностью одновременного возникновения крайних отклонений у составляющих звеньев.

Рассмотрим примеры использования статистического метода прогнозирования на базе разработанной системы моделирования рабочих процессов интегрированных технологий.

Главная форма системы с исходными данными для решения прямой и обратной задач анализа временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня представлена на рис. 3.2.

Параметры звеньев временной цепи (час.) имели следующие типы и субпараметры:

- *T*_Σ общее время создания изделия. Детерминированный параметр Par1: значение 40;
- T_{3Dmod} создание 3D модели. Стохастический нечеткий параметр Par2: распределение *TriangRight*($x, X_{min} = 8, X_{max} = 16$);
- T_{Form} формообразование на установке SLA (лазерная стереолитография) или SLS (избирательное лазерное спекание). Стохастический нечеткий параметр Par3: распределение $Triang(x, X_{min} = 6, X_{mod} = 8, X_{max} = 12);$

• T_{PP1} - постпроцесс №1 (SLA - окончательное отвердение в ультрафиолетовой камере, SLS - очистка от порошка). Стохастический нечеткий параметр Par4: распределение $Trapez(x, X_{min} = 2, X_{mod1} = 4, X_{mod2} = 6, X_{max} = 12);$

руппа (примечание)	Расчет (примечание)	Параметры Варианта		
Группа № 2 – Время	Анализ временных цепей 📥 производства изделий	Числовые 6 📩 Логически		
создания излелий	тенеративными	Nº 1 TSigma - общее время	<u>Nº15</u>	
интегрирован	Вариант расчета (примечание) Прямая задача - определение полного цикла создания изделий генеративныхи	№ 2 T3Dmod - 3D модель	Nº16	
нымигенерати		№ 3 TForm - формообразов.	N217	
технологиями		№ 4 ТРР1 - постпроцесс №1	N⊵18	
макроуровня		№ 5 TPP2 - постпроцесс №2	Nº19	
	Particular and a family	№ 6 ТРРЗ - постпроцесс №3	N=20	
M Ip. PacBap	Data_Cal Данные Г	№ 7	Nº21	
1 5 1	Т Номер Расчета	Nº 8	N≌22	
	Генерирование выборки	Nº 9	Nº23	
T 1 6 3	Инициализ. 100001	N≌10	N924	
	Выборка 100000	N£ 11	Nº25	
▼ 2 万 1	29/03/2005 20:53:43 DT1	Nº12	Nº26	
2 7 2	Расчет Редактиров.	Nº13:	Nº27	
▼ 2 7 4	29/03/2005 20:54:51 DT2	N214	Субпараметр 1 🕂	
	Анализ 🔽 🕅	IPar1 T IPar2 T IPar3 T		
	Инт. пистограмм	IPar4 T IPar5 T IPar6 T	Т. Т	

Рисунок 3.2 – Главная форма системы с исходными данными для решения прямой и обратной задач анализа временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня • T_{PP2} - постпроцесс №2 (SLA - термообработка, SLS - выжигание полимера и инфильтрация). Стохастический нечеткий параметр Par5: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 1, X_{mod} = 2, X_{max} = 5)$;

• T_{PP3} - постпроцесс №3 (слесарная шлифовка, полировка, окраска и пр.). Стохастический нечеткий параметр Par6: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 2, X_{max} = 4)$.

Гистограммы результатов статистического анализа исходных данных для решения прямой и обратной задач анализа временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня приведены на рис. 3.3.

3.4.1. Решение прямой задачи временных цепей создания изделий

Решение прямой задачи выполнялось в соответствии с выражением (3.1) для временной технологической цепи общего времени создания изделий $T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3}$. Результирующая гистограмма общего времени создания изделий представлена на рис. 3.4. Оценка соответствия результирующей гистограммы с теоретическими законами распределений показала, что наилучшее приближение соответствует гамма-распределению: *Gamma*(*b*, *c*), где b = 0.3533 - параметр масштаба; c = 86.6938 - параметр формы. Погрешности замены эмпирического распределения теоретическим: абсолютная ошибка (максимальное значение) - nErAbsMaxVal = -0.003004 № 13); относительная ошибка (максимальное (интервал значение) nErRelMaxVal = 1031% (интервал N_{2} 1); среднее относительное отклонение nErRelMean = 4.14%;среднеквадратическое относительное отклонение nErRel2Mean = 5.84%.

Экранная форма С результатами прогнозирования вероятности нахождение общего времени создания изделий в заданном доверительном решении прямой задачи анализа интервале при временных цепей интегрированных генеративных технологий макроуровня представлена на рис. 3.5. Общее время создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 20.42÷44.05 час. и имеет среднеарифметическое 30.63 час. значение При статистическом прогнозировании общего времени создания изделий возникает необходимость оценки степени риска, вызванного уменьшением доверительного интервала. Производственная необходимость максимально снизить сроки создания изделий напрямую связана с экономической эффективностью интегрированных генеративных технологий макроуровня. На полигоне анализируемого распределения (в относительных координатах рис. 3.5) имеется возможность установки новых доверительных интервалов, для рассматриваемого случая -







Рисунок 3.5 – Экранная форма с результатами прогнозирования вероятности нахождения общего времени создания изделий в заданном доверительном интервале при решении прямой задачи анализа временных цепей интегрированных генеративных технологий макроуровня 20.42÷36.01 час. (66% исходного). При этом риски того, что общее время создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.9%, что является приемлемым для практики.

3.4.2. Решение обратной задачи временных цепей создания изделий

Решение обратной задачи временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня выполнялось для пяти дополнительных вариантов (при установке значений субпараметра варианта расчета $nSub = 2 \div 6$) в соответствии с расчетными зависимостями (3.2) ÷(3.6). Гистограммы результатов расчетов обратных задач анализа временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня представлены на рис. 3.6. Особенностью решения обратных задач является то, что результат решения представляет собой временное звено, которое в отличие от общего времени создания изделий необходимо удлинить. Если при решении прямой задачи технологических временных цепей исходный интервал значений усекался со стороны больших значений, то при решении обратной задачи усечение должно быть левосторонним.

Рассмотрим эту особенность решения обратной задачи анализа технологических временных цепей на примере составляющей формообразования изделий непосредственно на RP-установке.

Гистограмма времени формообразования на RP-установке создания изделий генеративными технологиями макроуровня представлена на рис. 3.7. Оценка результирующей гистограммы с соответствия теоретическими законами распределений показала, что наилучшее приближение соответствует бета-распределению: Beta(v, w, b), где v = 10.536, w = 4.9257 – параметры формы; b = 26.4785 – параметр масштаба. Погрешности замены эмпирического распределения теоретическим: абсолютная ошибка (максимальное значение) nErAbsMaxVal 0.002433 (интервал № 34); относительная =ошибка (максимальное значение) — nErRelMaxVal = 174.2% (интервал № 2); среднее относительное отклонение - nErRelMean = 3.02%; среднеквадратическое относительное отклонение — nErRel2Mean = 4.36%.

Экранная форма с результатами прогнозирования вероятности нахождения времени формообразования на RP-установке в заданном доверительном интервале при решении обратной задачи анализа временных цепей интегрированных генеративных технологий макроуровня представлена на рис. 3.8.

Общее время формообразования на RP-установке для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 6.06÷26.48 час. и имеет среднеарифметическое значение 18.04 час. На полигоне анализируемого





Рисунок 3.8 – Экранная форма с результатами прогнозирования вероятности нахождения времени формообразования на RP-установке в заданном доверительном интервале при решении обратной задачи анализа временных цепей интегрированных генеративных технологий макроуровня распределения (в относительных координатах рис. 3.8) имеется возможность установки новых доверительных интервалов, для рассматриваемого случая – 12.8÷26.48 час. (33% слева — 67% исходного). При этом риски того, что общее время создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.2%.

Заключение

Таким образом, использование статистического прогнозирования для задач расчета временных цепей решении при создании изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня является эффективным инструментом анализа существующих и проектируемых рабочих процессов. Для дальнейшего развития предложенных подходов необходимо разработать обобщенную модель технологического времени.

Список литературы к разделу 3

- Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Г. Основы математического моделирования технических систем: Учеб. пос. - Брянск: БГТУ, 2004. -271 с.
- Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2000. - 352 с.
- Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. -М.: Машиностроение, 2005. - 736 с.
- Болдин Л.А. Основы взаимозаменяемости и стандартизация в машиностроении: Учебн. пос. для вузов. - М.: Машиностроение, 1984. -272 с.
- 5. Джекел П. Применение методов Монте-Карло в финансах: Пер. с англ. М.: Интернет-трейдинг, 2004. 256 с.
- 6. Дубров А.М., Лагоша Б.А., Хрусталев Е.Ю. Моделирование рисковых ситуации в экономике и бизнесе: Учеб. пособие / Под ред. Б.А. Лагоши.
 М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
- 7. Дунаев П.Ф. Размерные цепи. М.: Машгиз, 1963. 308 с.
- 8. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.
- 9. Недосекин А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. Л.: Санкт-Петербург, 2002. 181 с.
- 10. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
- 11. Орлов А.И. Высокие статистические технологии // Заводская

лаборатория. - 2003. - Т.69. - № 11. С. 55-60.

12. Орлов А.И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. - 1996. - Т.
62. - № 1. - С. 54-60.

4. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МАКРОУРОВНЯ

Введение

Представлены результаты разработки обобщенной стохастической модели технологического времени генеративных технологий макроуровня применительно к лазерной стереолитографии (SLA) и селективному лазерному спеканию (SLS). Рассмотрены результаты статистического анализа структуры технологического времени.

При разработке обобщенной модели технологического времени решались следующие задачи:

- Возможность практического использования модели при статистическом прогнозировании технологического времени применительно к процессам лазерной стереолитографии (SLA) и избирательного лазерного спекания (SLS);
- Возможность расширения модели на другие генеративные технологии макроуровня. Эта возможность обеспечивается заданием и учетом при вычислениях дополнительного параметра, определяющего анализируемый способ построения изделий.
- Выбор обозначения переменных, обеспечивающий языковую совместимость с англоязычными программными продуктами. Обозначение переменных в работе производилось по следующему правилу: nName, где "n" префиксный символ-идентификатор значения параметра или процедуры его вычисления; Name условное обозначение (имя) параметра.

Ранее разработанная аналитическая модель технологического времени [2, 6] ориентирована на учет особенностей только лазерной стереолитографии (SLA) при решении детерминированных задач.

4.1. Структурная модель технологического времени

Технологический процесс изготовления (формообразования) изделий послойным выращиванием для большинства существующих способов можно представить в виде последовательности следующих операций, характеризующихся временем их выполнения:

$$T_{Form} = T_{Home} + \left(T_{Add} + T_{Work}\right) + T_{End}, \qquad (4.1)$$

где *Т_{ноте}* - подготовительные операции (монтаж рабочей платформы, дозаправка рабочей емкости исходными материалами, стабилизация

условий формообразования): SLA - относительно общего времени формообразования имеет несущественное значение 0.1÷0.2 час.; SLS — 2.5÷3.5 час. (без учета смены материала составляющей — 7÷9 час.). Подготовительное время для SLS включает разравнивание порошка и нагрев (прогрев) рабочей зоны;

 T_{Add} - послойное построение дополнительных технологических элементов: SLA - нижние опоры высотой 6÷10.7 мм (для стекания избыточного фотомономера) и поддержки (при необходимости, в соответствии с конструктивными особенностями изделий и схемой их технологического базирования); SLS - температурный амортизатор толщиной 1.27÷3.5 мм, расположенный под основанием детали на глубине 1.5 мм (через прослойку исходного порошка);

T_{Work} - послойное рабочее формообразование непосредственно изделий;

T_{End} - заключительные операции 0.1÷0.2 час. (демонтаж изделий с рабочей платформы).

В формуле технологического времени (4.1) совместное выделение времени формообразования изделий T_{Work} и дополнительных технологических элементов T_{Add} определяется их послойным выращиванием.

4.2. Параметрическая вероятностная модель

Параметры, определяющие время формообразования изделий генеративными методами макроуровня, можно разбить на следующие группы: обобщенные параметры, характеризующие технологические свойства изделий технологические их 3D геометрии; по параметры, косвенно или непосредственно влияющие (входя составной частью в расчетные зависимости) на время формообразования изделий.

Обобщенные параметры, характеризующие технологические свойства изделий и определяемые по их 3D геометрии, можно представить в виде системы абсолютных детерминированных и относительных вероятностных показателей, которые определяются из следующих соображений:

- Изделия занимают некоторую область рабочего пространства установки, характеризующуюся габаритами по координатным осям: *X_A*; *Y_A*; *Z_A*, где *X*, *Y*, *Z* соответственно координатные оси по длине, ширине и высоте, мм;
- Исходная высота изделий H_W определяется как максимальный размер по оси Z, тогда $H_W = Z_A$, а интервал возможных значений координат двумерных сечений соответствует $z = 0 \div H_W$;
- Площадь (номинальная) рабочей области, занимаемой изделиями S_A, в

общем случае меньше или равна произведению габаритных размеров по осям $X, Y: S_A \leq X_A \times Y_A;$

- В общем случае фактическая площадь сечения изделий $S_{AZ} = f(z)$ по координате Z может находиться в интервале $S_{AZ} = S_A \div 0$. Необходимо отметить, что при рациональном базировании изделий меньшим значениям z будут соответствовать большие значения S_{AZ} (из соображений устойчивости размещения на платформе);
- Переход от площади рабочей области S_A (габаритной) к фактической площади сечения изделий S_{AZ} можно произвести, введя безразмерный коэффициент заполнения рабочей области изделиями K_s. Возможны два варианта его описания: первый - детерминированный функциональный, где в качестве аргумента будет использоваться координата (высота) сечения z или относительная координата сечения $z_{(\text{отн})} = z / H_A$; второй стохастический, где его плотность вероятности определяется в интервале задания $0 \le X_{\min} \dots X_{\max} \le 1$. Первый вариант предполагает морфологического наличие математического аппарата анализа триангулированных 3D моделей, отсутствующего в настоящее время. Второй вариант относительно просто реализуем на базе экспертных вероятностных моделей для всех возможных форм и конфигураций изделий, установленных на рабочей платформе установки. Тогда, окончательно имеем выражение для площади сечения изделий:

$$S_{AZ} = K_S S_A; K_S \sim f \left[z, X_{\min} = K_{S(\min)}, \dots, X_{\max} = K_{S(\max)} \right],$$
 (4.2)

где K_S - независимая случайная величина с заданным законом распределения и областью задания, соответствующей интервалу ожидаемых значений для конкретной конфигурации изделий.

 Переход от габаритных размеров рабочей области X_A, Y_A к их фактическим размерам в сечении изделий по высоте X_{AZ}, Y_{AZ} можно произвести, введя безразмерные коэффициенты K_X, K_Y (по аналогии с площадью). Тогда выражения для размеров площади сечения изделий по осям X, Y будут иметь следующий вид:

$$X_{AZ} = K_X X_A; \ K_X \Box f \Big[z, X_{\min} = K_{X(\min)}, \dots, X_{\max} = K_{X(\max)} \Big];$$
 (4.3)

$$Y_{AZ} = K_Y Y_A; \quad K_Y \square f \Big[z, X_{\min} = K_{Y(\min)}, \dots, X_{\max} = K_{Y(\max)} \Big], \quad (4.4)$$

где K_X , K_Y - независимые случайные величины с заданными законами распределения и областями задания соответствующими интервалам их 89

ожидаемых значений для конкретной конфигурации изделий.

Таким образом, 3D геометрическими обобщенными технологическими параметрами являются: X_A , Y_A , Z_A - габаритные размеры по соответствующим осям (детерминированные абсолютные значения) и безразмерные коэффициенты K_S , K_X , K_Y - независимые случайные величины с заданными законами распределения.

К характеристикам лазерного луча относятся следующие параметры:

• Мощность W_L , Вт. Данный параметр является косвенным, т. к. не входит в расчетные зависимости в явном виде. Однако диапазон его значений носит принципиальный характер, определяя степень воздействия на обрабатываемый материал и тем самым области возможных значений толщины слоев и скоростей их сканирования лазерным лучом. Для рассматриваемого случая мощность имеет следующие диапазоны значений: SLA (твердотельный лазер, мощность не регулируется) - $W_L = 0.2 \div 0.25$ Вт. (0.2 соответствует нижнему эксплуатационному пределу износа, 0.25 - номинальное значение); SLS (газовый лазер с регулируемой мощностью) - $W_L = 1 \div 90$ Вт., где значения задаются в зависимости от материала порошка и элементов послойных сечений (наружные и внутренние контуры, заштриховка).

• Диаметр пятна лазерного луча D_L , мм. Для используемых в исследовании установок SLA и SLS - $D_L = 0.23 \div 0.27$ мм.

• Скорость луча лазера V_L, мм/с: SLA - 3000÷5000; SLS - 6000÷10000.

Прочие технологические параметры целесообразно рассмотреть при формировании модели времен послойного выращивания непосредственно изделия T_{Work} и дополнительных технологических элементов T_{Add} .

Всякий элементарный акт формирования отдельного слоя может состоять в общем случае из четырех процедур и определяется временем их выполнения:

- Формообразование (Shaping) слоя *T_{WS}*, *T_{AS}* (SLA время воздействия лазерного луча на поверхностный слой фотомономерной смолы; SLS на поверхность порошкового материала);
- Опускание (Cast) рабочей платформы на толщину последующего слоя *T_{WC}*, *T_{AC}*: списочные дискретные значения - 0.05, 0.1, 0.15 мм (SLA); непрерывные значения 0.076÷0.15 мм (SLS);
- Выравнивание (Alignment) сформированного слоя или новой порции исходного материала *T_{WA}*, *T_{AA}*. Технологическая точка выполнения: SLA после сканирования лазерным лучом (добавление или снятие излишков материала путем инжекции из полости специального выравнивающего ножа); SLS перед сканированием (выравнивание и некоторое уплотнение материала специальным роликом насыпная плотность

изделия и порошка отличаются до 2-х раз). Направление линейной скорости вращения ролика совпадает с направлением перемещения его оси. Синхронизация вращения ролика с его перемещением обеспечивается реечной передачей. Делительный диаметр зубчатого колеса на оси ролика в 2÷3 раза больше его диаметра. Поверхность ролика имеет регулярный рельеф 10÷20 мкм;

• Выдержка (Delay) *T_{WD}*, *T_{AD}*. В общем случае время выдержки представляет собой время, необходимое для восстановления рабочих параметров процесса. Время выдержки имеет место как для SLA (выравнивание поверхности фотомономера 0÷60 с), так и для SLS (температурная стабилизация 0÷1200 с).

Тогда с учетом рассмотренных процедур можно записать общие выражения для времен выращивания *i*-го слоя непосредственно изделия T_{Work} и *j*-го - дополнительных технологических элементов T_{Add} :

$$T_{Work(i)} = T_{WS(i)} + T_{WC(i)} + T_{WA(i)} + T_{WD(i)};$$
(4.5)

$$T_{Add(j)} = T_{AS(j)} + T_{AC(j)} + T_{AA(j)} + T_{AD(j)},$$
(4.6)

где обозначения составляющих времен рассмотрены выше.

Время формообразования единичного слоя определяется следующими зависимостями:

$$T_{WS(i)} = S_A K_S K_{WR} / (D_L V_L); \qquad (4.7)$$

$$T_{AS(j)} = S_A K_{AB} K_{AR} / (D_L V_L), \qquad (4.8)$$

где S_A - площадь рабочей области, занимаемой изделиями, мм²; K_S вероятностный коэффициент заполнения рабочей области деталями; K_{WR} коэффициент проходов луча при построении изделий (целочисленные значения: SLA - 1÷32, SLS - 1÷10); D_L - диаметр пятна лазерного луча, мм; V_L - скорость луча лазера, мм/с; K_{AB} - коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов (SLA - 0.2÷0.9, SLS - 1); K_{AR} - коэффициент проходов луча при построении дополнительных технологических элементов (целочисленные значения: SLA - 1÷30, SLS -1÷10).

Время опускания рабочей платформы при создании отдельного слоя определяется тем, что она со скоростью V_P опускается на глубину слоя h_C и дополнительно может опуститься, а затем подняться на некоторую заданную

величину:

$$T_{WC(i)} = (h_C + 2h_{WP})/V_P; \qquad (4.9)$$

$$T_{AC(j)} = \left(h_C + 2h_{AP}\right) / V_P, \qquad (4.10)$$

где h_C - толщина формируемого слоя (SLA - списочные дискретные значения: 0.05, 0.1, 0.15 мм; SLS - непрерывные значения в интервале 0.076÷0.15 мм); h_{WP} , h_{AP} - глубина дополнительного опускания платформы (SLA: $h_{WP} = 0.01 \div 0.02$, $h_{AP} = 6.25 \div 15$ мм; SLS - h_{WP} , $h_{AP} = 0$); V_P - скорость опускания рабочей платформы (SLA, SLS - 1÷3 мм/с).

Время выравнивания сформированного слоя или новой порции исходного материала T_{WA} , T_{AA} . С учетом существенного различия этой процедуры для SLA и SLS при формировании слоев изделий и вспомогательных технологических элементов рассмотрим их отдельно с последующим формированием обобщенных зависимостей.

Формирование слоев изделий. При лазерной стереолитографии (SLA) после формирования каждого слоя и опускания платформы происходит выравнивание поверхности фотомономера за один или несколько проходов выравнивающего ножа (технологический параметр $K_{WC} = 1 \div 3$), перемещающегося вдоль оси Y со скоростью $V_C = 4 \div 22$ мм/с. Перемещение выравнивающего ножа равно сумме линейного размера рабочей области УАZ (4.4) по оси У (на заданной высоте сечения z) и длине подвода и перебега $L_C = 5 \div 15$ мм. При селективном лазерном спекании (SLS) производится только один проход выравнивающего ролика ($K_{WC} = 1$), перемещающегося вдоль оси X со скоростью $V_C = 76.2 \div 304.8$ мм/с. Величина перемещения выравнивающего ролика не зависит от размеров рабочей области изделий и соответствует длине рабочего хода, значение которого определяется конструкцией установки $L_{C} = 1200$ мм. Таким образом, время выравнивания при создании слоев изделий с учетом (4.4) можно представить следующей зависимостью:

$$T_{WA(i)} = \begin{cases} K_{WC} \left(K_Y Y_A + L_C \right) / V_C, & \text{для SLA;} \\ L_C / V_C, & \text{для SLS,} \end{cases}$$
(4.11)

где K_Y - вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y, (SLA независимая случайная величина с заданным законом распределения и областью задания, соответствующей интервалу ожидаемых значений для конкретной конфигурации изделий ($0 < K_Y \le 1$); SLS - не учитывается); Y_A , - габаритные размеры по оси Y (SLA - детерминированная величина; SLS - не учитывается); L_C , V_C - соответственно длина рабочего хода и скорость выравнивающего элемента установки; K_{WC} - коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки.

Формирование слоев дополнительных технологических элементов. Для лазерной стереолитографии (SLA) при построении опор выравнивание не производится ($T_{AA(j)} = 0$). При селективном лазерном спекании (SLS) при построении температурного экрана время выравнивания то же самое, что и для слоев изделий ($T_{AA(j)} = T_{WA(i)}$). Таким образом, время выравнивания при создании слоев дополнительных технологических элементов можно представить следующей зависимостью:

$$T_{AA(j)} = \begin{cases} 0, & \text{для SLA;} \\ L_C / V_C, & \text{для SLS,} \end{cases}$$
(4.12)

где обозначения соответствуют (4.11).

Времена выдержки при построении единичных слоев $T_{WD (i)}, T_{AD (j)}$ являются технологическими параметрами и имеют следующий интервал задания: SLA (выравнивание поверхности фотомономера) $T_{WD (i)}, T_{AD (j)} = 0.60$ с); SLS (температурная стабилизация) $T_{WD (i)}, T_{AD (j)} = 0.1200$ с).

Переход от времен выращивания отдельных слоев $T_{Work(i)}$, $T_{Add(j)}$ к времени формообразования изделий T_{Work} и дополнительных технологических элементов T_{Add} можно выполнить через их количество:

$$N_W = H_W / h_C; \ N_A = H_A / h_C,$$
 (4.13)

где H_W , H_A - соответственно высоты (по координате Z) изделий и дополнительных технологических элементов; h_C - толщина слоев при послойном выращивании.

Тогда окончательно имеем структурно однородные выражения для времен формообразования изделий и вспомогательных технологических элементов:

$$T_{Work} = \sum_{i=1}^{N_W} T_{Work(i)} = \frac{H_W}{h_C} \Big[T_{WS(i)} + T_{WC(i)} + T_{WA(i)} + T_{WD} \Big]; \qquad (4.14)$$

$$T_{Add} = \sum_{j=1}^{N_A} T_{Add(j)} = \frac{H_A}{h_C} \Big[T_{AS(j)} + T_{AC(j)} + T_{AA(j)} + T_{AD} \Big], \qquad (4.15)$$

где обозначения переменных рассмотрены выше.

Укрупненная схема обобщенной модели времени полного цикла создания

изделий генеративными технологиями макроуровня и ее связь с обобщенной моделью технологического времени представлена на рис. 4.1. В этой схеме не учтены некоторые особенности расчетов, которые будут рассмотрены ниже.

4.3. Параметры обобщенной модели технологического времени изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня

Параметры обобщенной модели технологического времени изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня представлены в табл. 1.1 ([7, 8]). Общее количество параметров, представленных В табл. 1.1. соответствует 22. Два параметра, не имеющие порядковых номеров, являются резервными для возможности расширения обобщенной модели времени полного цикла изготовления изделий на другие генеративные технологии. К ним относятся: Х_А - длина рабочей области, занимаемой изделиями по оси Х, мм (группа - Характеристики 3D геометрии изделий); W_L - мощность, Вт (группа -Параметры лазерного луча).

Для практической реализации моделирования полного времени создания изделий, анализа его структуры и статистического прогнозирования значений на основе разработанной схемы (рис. 4.1) и системы параметров (табл. 4.1) была разработана система пользовательских функций, построенная по иерархическому При построении функций принципу. пользователя использованы ранее полученные расчетные зависимости: (4.1), (4.5) ÷ (4.15). функций описанию Иерархия пользовательских соответствует ИХ В последовательности самого верхнего уровня (• – обшее ОТ время формообразования на RP-установке) до промежуточных характеристик и исходных параметров, где список параметров заключен в операторные скобки:

- *Т_{Form}* Общее время формообразования на RP-установке, час.:
- $nT_{Form} = T_{Form}(cRP, S_A, K_S, K_{WR}, D_L, V_L, h_C, h_{WP}, V_P, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C, T_{WD}, H_W, K_{AB}, K_{AR}, h_{AP}, T_{AD}, H_A, T_{Home}, T_{End}) = T_{Home} + T_{Work}(cRP, S_A, K_S, K_{WR}, D_L, V_L, h_C, h_{WP}, V_P, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C, T_{WD}, H_W) + T_{Add}(cRP, S_A, K_{AB}, K_{AR}, D_L, V_L, h_C, h_{AP}, V_P, L_C, V_C, T_{AD}, H_A) + T_{End};$ (4.16)
- •• *Т_{Work}* Общее время формообразования изделий, час.:
- $nT_{Work} = T_{Work}(cRP, S_A, K_S, K_{WR}, D_L, V_L, h_C, h_{WP}, V_P, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C, T_{WD}, H_W) = H_W * T_{Work_i}(cRP, S_A, K_S, K_{WR}, D_L, V_L, h_C, h_{WP}, V_P, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C, T_{WD}) / h_C / 3600;$ (4.17)

••• T_{Work_i} - Общее время формообразования единичного слоя изделий, с: $nT_{Work_i} = T_{Work_i}(cRP, S_A, K_S, K_{WR}, D_L, V_L, h_C, h_{WP}, V_P, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C, T_{WD})$ $= T_{WS_i}(S_A, K_S, K_{WR}, D_L, V_L) + T_{WC_i}(h_C, h_{WP}, V_P) + T_{WA_i}(cRP, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C) + T_{WD};$ (4.18)

••• *Т_{WS_i}* - Время формообразования единичного слоя изделий, с:

- $nT_{WS_{i}} = T_{WS_{i}}(S_{A}, K_{S}, K_{WR}, D_{L}, V_{L}) = IIF(D_{L} > 0 \quad AND \quad V_{L} > 0,$ $S_{A} * K_{S} * K_{WR} / D_{L} / V_{L}, 0); \qquad (4.19)$
- •••• *Т_{WC_i}* Время опускания рабочей платформы при создании единичного слоя изделий, с:

$$nT_{WC_i} = T_{WC_i}(h_C, h_{WP}, V_P) = IIF(V_P > 0, (h_C + 2*h_{WP}) / V_P, 0);$$
(4.20)

•••• *Т*_{WA_i} - время выравнивания единичного слоя изделий, с:

- $nT_{WA_i} = T_{WA_i}(cRP, K_{WC}, K_Y, Y_A, L_C, V_C) =;$ (4.21) E cлu cRP == "SLA" &азерная стереолитография, $nT_{WA_i} = IIF(V_C > 0, K_{WC} * (K_Y * Y_A + L_C) / V_C, 0);$ E cлu cRP == "SLS" &селективное лазерное спекание, $nT_{WA_i} = IIF(V_C > 0, L_C / V_C, 0);$
- •• *Т_{Аdd}* Общее время формообразования технологических элементов, час.:
- $nT_{Add} = T_{Add}(cRP, S_A, K_{AB}, K_{AR}, D_L, V_L, h_C, h_{AP}, V_P, L_C, V_C, T_{AD}, H_A) = H_A * T_{Add_i}(cRP, S_A, K_{AB}, K_{AR}, D_L, V_L, h_C, h_{AP}, V_P, L_C, V_C, T_{AD}) / h_C / 3600;$ (4.22)
- ••• *T_{Add_i}* Общее время формообразования единичного слоя технологических элементов, с:
- $nT_{Add_{i}} = T_{Add_{i}}(cRP, S_{A}, K_{AB}, K_{AR}, D_{L}, V_{L}, h_{C}, h_{AP}, V_{P}, L_{C}, V_{C}, T_{AD}) = T_{AS_{i}}(S_{A}, K_{AB}, K_{AR}, D_{L}, V_{L}) + T_{AC_{i}}(h_{C}, h_{AP}, V_{P}) + T_{AA_{i}}(cRP, L_{C}, V_{C}) + T_{AD};$ (4.23)
- •••• *T_{AS_i}* время формообразования единичного слоя технологических элементов, с;
- $nT_{AS_{-}i} = T_{AS_{-}i}(S_A, K_{AB}, K_{AR}, D_L, V_L) = IIF(D_L > 0 \quad AND \quad V_L > 0,$ $S_A * K_{AB} * K_{AR} / D_L / V_L, 0); \qquad (4.24)$
- •••• *T_{AC_i}* время опускания рабочей платформы при создании единичного слоя технологических элементов, с:

$$nT_{AC_i} = T_{AC_i}(h_C, h_{AP}, V_P) = IIF(V_P > 0, (h_C + 2*h_{AP}) / V_P, 0);$$
(4.25)

•••• *T_{AA_i}* - время выравнивания единичного слоя технологических элементов, с:

$$nT_{AA_{-}i} = T_{AA_{-}i}(cRP, L_C, V_C) =;$$
 (4.26)
 $E c \pi u cRP == "SLA" &$ азерная стереолитография,
 $nT_{AA_{-}i} = 0;$
 $E c \pi u cRP == "SLS" &$ селективное лазерное спекание,
 $nT_{AA_{-}i} = IIF(V_C > 0, L_C / V_C, 0).$

Полученная система пользовательских функций является основой для дальнейшего моделирования технологического времени создания изделий, анализа его структуры и статистического прогнозирования значений выходных характеристик.



Рисунок 4.1 – Схема обобщенной модели времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня.

Таблица 4.1 – Параметры обобщенной модели технологического времени генеративных технологий макроуровня

№ µan	Обоз	Наименование	RP	Значения
nap.	Со	ставляющие технологического времени изготовле	гния из	делий
1	T _{Home}	подготовительные операции (монтаж рабочей	SLA	0.1÷0.2
	110.110	платформы, дозаправка рабочей емкости	SLS	2.5÷12.5
		исходными материалами, стабилизация		
		условий формообразования), час.		
2	T _{End}	заключительные операции (демонтаж изделий с	SLA	0.1÷0.2
		рабочей платформы), час.	SLS	0.1÷0.2
		Характеристики 3D геометрии изделий	1	
	X_A	длина рабочей области, занимаемой изделиями	SLA	< 508
		по оси Х, мм	SLS	< 380
3	Y_A	ширина рабочей области, занимаемой	SLA	< 508
		изделиями по оси Y, мм	SLS	< 320
4	H_W	высота рабочей области, занимаемой	SLA	< 584
		изделиями по оси Z, мм	SLS	< 450
5	S_A	площадь рабочей области, занимаемой	SLA	< 508×508
		изделиями, мм ²	SLS	< 380×320
6	K_S	вероятностный коэффициент заполнения	SLA	0÷1
		рабочей области изделиями	SLS	0÷1
7	K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения	SLA	0÷1
		по оси У	SLS	не учитыв.
Параметры лазерного луча				
	W_L	мощность, Вт	SLA	0.2÷0.25
			SLS	1÷90
8	D_L	диаметр пятна лазерного луча, мм	SLA	0.23÷0.27
			SLS	0.23÷0.27
9	V_L	скорость луча лазера, мм/с	SLA	3000÷5000
			SLS	6000÷10000
Параметры формообразования				
10	h_C	толщина формируемого единичного слоя, мм	SLA	0.05, 0.1, 0.15
			SLS	0.076÷0.15
11	K _{WR}	коэффициент проходов луча при построении	SLA	1÷32
		изделий	SLS	1÷10
12	H_A	высота (по координате Z) дополнительных	SLA	6÷10.7
	1	TAVILOTOPHILOCHUY OTAMAUTOD MM	61 6	1 27.25

продолжение табл. 4.1

No	Обоз			
пар.	нач.	Наименование	RP	Значения
13	K _{AB}	коэффициент заполнения дополнительных	SLA	0.2÷0.9
		технологических элементов	SLS	1
14	K _{AR}	коэффициент проходов луча при построении	SLA	1÷30
		дополнительных технологических элементов	SLS	1÷10
		Параметры опускания рабочей платформ	ы	
15	h_{WP}	глубина дополнительного опускания	SLA	0.01÷0.02
		платформы при построении изделий	SLS	0
16	h _{AP}	глубина дополнительного опускания при	SLA	6.25÷15
		построении технологических элементов	SLS	0
17	V_P	скорость опускания рабочей платформы, мм/с	SLA	1÷3
			SLS	1÷3
Параметры выравнивания формируемого слоя				
18	L_C	длина подвода-перебега или рабочего хода	SLA	5÷15
		выравнивающего элемента установки, мм	SLS	1200
19	V_C	скорость перемещения выравнивающего	SLA	4÷22
		элемента установки, мм/с	SLS	76.2÷304.8
20	K _{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего	SLA	1÷3
		элемента установки при построении изделий	SLS	не учитыв.
Параметры выдержки при построении				
21	T_{WD}	время выдержки при построении изделий, с	SLA	0÷60
			SLS	0÷1200
22	T_{AD}	время выдержки при построении	SLA	0÷60
		технологических элементов, с	SLS	0÷1200

Примечания:

1. Обозначение RP-технологий: SLA - лазерная стереолитография;

SLS - селективное лазерное спекание.

2. Позиции, не имеющие номера параметра, приведены для справки.

4.4. Статистический анализ структуры технологического времени

Анализ структуры технологического времени интегрированных технологий макроуровня целесообразно разбить на три этапа с определением в них определенного набора абсолютных каждом ИЗ И относительных характеристик (номер этапа соответствует значению субпараметра В процедурной модели):

• Этап 1. Статистический анализ структуры технологического времени:

 $R1 = T_{Form}$ (4.16) - общее время формообразования на установке, час;

 $R2 = T_{Work}$ (4.17) - общее время формообразования изделий, час;

- $R3 = T_{Add}$ (4.22) общее время формообразования технологических элементов, час;
- $X1 = T_{Work} / T_{Form}$ относительное общее время формообразования изделий;
- X2 = *T_{Add}* / *T_{Form}* относительное общее время формообразования технологических элементов;
- $X3 = T_{Add} / T_{Work}$ отношение времен формообразования технологических элементов и изделий.
- Этап 2. Статистический анализ общего времени формообразования единичного слоя изделий:
- R1 = *T_{Work_i}* (4.18) общее время формообразования единичного слоя изделий, с;
- $R2 = T_{WS i}$ (4.19) время формообразования единичного слоя изделий, с;
- R3 = *T*_{*WC_i*} (4.20) время опускания рабочей платформы при создании единичного слоя изделий, с;

 $X1 = T_{WA_i}$ (4.21) - время выравнивания единичного слоя изделий, с;

X2 = *T*_{WS_i} / *T*_{Work_i} - относительное время формообразования единичного слоя изделий

 $X3 = T_{WC_i} / T_{Work_i}$ - относительное время опускания рабочей платформы;

 $Y1 = T_{WA_i} / T_{Work_i}$ - относительное время выравнивания;

 $Y2 = T_{WD_i} / T_{Work_i}$ - относительное время выдержки.

- Этап 3. Статистический анализ общего времени формообразования единичного слоя технологических элементов:
- $R1 = T_{Add_i}$ (4.23) общее время формообразования единичного слоя технологических элементов, с;
- $R2 = T_{AS_i}$ (4.24) время формообразования единичного слоя технологических элементов, с;
- $R3 = T_{AC_i}$ (4.25) время опускания рабочей платформы при создании единичного слоя технологических элементов, с;
- $X1 = T_{AA_i}$ (4.26) время выравнивания единичного слоя технологических элементов, с;
- $X2 = T_{AS_i} / T_{Add_i}$ относительное время формообразования единичного слоя;
- $X3 = T_{AC_i} / T_{Add_i}$ относительное время опускания рабочей платформы;

 $Y1 = T_{AA_i} / T_{Add_i}$ - относительное время выравнивания;

 $Y2 = T_{AD_{i}} / T_{Add_{i}}$ - относительное время выдержки.

Анализ структуры технологического времени производился для лазерной стереолитографии (SLA) и селективного лазерного спекания (SLS). Параметры задавались по равномерному закону распределения в интервалах предельно допустимых значений в соответствии с данными табл. 1.1.



Рисунок 4.2 – Результаты статистического анализа структуры технологического времени создания изделий

При статистическом моделировании [1, 3, 4, 5] использовались выборки, состоящие из 50000 вариантов значений параметров и исследуемых характеристик процесса.

Результаты статистического анализа структуры технологического времени создания изделий при уровне рисков 5÷8% приведены на рис. 4.2.

Заключение

Статистическое прогнозирование значений относительных характеристик общего формообразования изделий времени И дополнительных технологических элементов показало, что время формообразования изделий составляет более 80% от общего времени работы установок SLA и SLS. Время формообразования единичного слоя изделий имеет следующую относительную структуру: формообразование 50÷99%; опускание рабочей платформы до 1%; выравнивание до 19%; выдержка до 27% (SLA); формообразование до 49%; опускание рабочей платформы менее 1%; выравнивание менее 1%; выдержка 43÷99% (SLS). Время формообразования единичного слоя вспомогательных технологических элементов имеет следующую относительную структуру: 62÷99%; формообразование опускание рабочей платформы до 11%: выравнивание 0%; выдержка до 27% (SLA); формообразование до 69%; опускание рабочей платформы менее 1%; выравнивание менее 1%; выдержка 30÷99% (SLS).

Список литературы к разделу 4

- Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Г. Основы математического моделирования технических систем: Учеб. пос. - Брянск: БГТУ, 2004. -271 с.
- 2. Вітязєв Ю.Б. Розширення технологічних можливостей прискореного формоутворення способом стереолітографії: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.08 / НТУ «Харк. пол. ін-т.», 2004. 20 с.
- Джекел П. Применение методов Монте-Карло в финансах: Пер. с англ. -М.: Интернет-трейдинг, 2004. - 256 с.
- 4. Дубров А.М., Лагоша Б.А., Хрусталев Е.Ю. Моделирование рисковых ситуации в экономике и бизнесе: Учеб. пособие / Под ред. Б.А. Лагоши.
 М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
- 5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.
- 6. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования И Товажнянский Л.Л., изготовления: 2-е ИЗД., перераб. И доп. / Чернышов С.И., Грабченко А.И., Верезуб Н.В., Витязев Ю.Б., 101

Доброскок В.Л., Кнут Х., Лиерат Ф. / Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. - Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2005. - 224 с.

- 7. Руководство по эксплуатации установки избирательного лазерного спекания SLS Vanguard Si2. 3D Systems, 2001. 58 с.
- 8. Руководство по эксплуатации установки лазерной стереолитографии SLA 5000. Дармштадт: 3D Systems, 1999. 118 с.

5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

Введение

Рассмотрены вопросы статистического прогнозирования при анализе временных цепей полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня. Приведены примеры практической реализации разработанных подходов, обеспечивающих повышение эффективности использования лазерной стереолитографии (SLA) за счет снижения уровня рисков при выполнении проектов по ее реализации.

5.1. Полный цикл создания изделий генеративными технологиями макроуровня

Полный цикл создания изделий $T_{\Sigma}(T_{Sigma})$ генеративными технологиями макроуровня можно представить в виде линейной последовательности периодов:

$$T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3},$$

где $T_{3D mod}$ - время создания электронных 3D моделей изделий; T_{Form} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания); T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} - времена различных этапов постобработки.

Применительно к технологии лазерной стереолитографии (SLA) могут использоваться следующие постпроцессы: T_{PP1} - постпроцесс № 1 - окончательная фотополимеризация изделия в специальной ультрафиолетовой камере мод. РСА 500; T_{PP2} - постпроцесс № 2 - выдержка изделия в специальном низкотемпературном термошкафу (для повышения температуры плавления полимера); T_{PP3} - постпроцесс № 3 - слесарная шлифовка, полировка, окраска и пр.

В каждом периоде имеет место процедура эволюции изделия и на каждом ее этапе достигается определенный эволюционный результат: $T_{3D mod}$ - файл (или система файлов) триангуляционного описания 3D моделей изделий (в STL-формате); T_{Form} - послойная материализация 3D моделей, т. е. прямой переход от электронного образа изделия в твердотельное состояние; T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} - придание изделиям требуемых эксплуатационных свойств и необходимого потребительского качества.

Полный цикл создания изделий интегрированными генеративными

103

технологиями макроуровня состоит из ряда закономерно расположенных и находящихся во взаимосвязи периодов (звеньев), представляющих временную цепь. Понятие временных цепей по аналогии с размерными цепями при решении технологических задач введено Б.М. Базровым [3].

Основной особенностью временных цепей создания изделий интегрированными технологиями макроуровня генеративными является высокий уровень неопределенности значений составляющих звеньев. Это связано с большим числом факторов, влияние которых практически учесть не представляется возможным. Таким образом, попытки использования только детерминированного подхода обречены на неудачу. Одним из перспективных современных подходов к решению задач при системной неопределенности исходных данных является использование нечетких экспертных оценок на базе интервальных, треугольных, трапециевидных и др. чисел [2, 8, 9, 10].

В настоящей работе расчет временных цепей производился методом статистического прогнозирования [1, 5, 6, 7]. Предлагаемый метод объединяет в себе возможности как полной, так и неполной взаимозаменяемости с оценкой доверительной вероятности нахождения значений замыкающего звена в заданном интервале или риска выхода за его границы.

При прогнозировании использовались обобщенные модели полного цикла изготовления изделий [4] и технологического времени генеративных технологий макроуровня [11].

Практическая реализация статистического прогнозирования времени полного цикла изготовления изделий должна выполняться, как правило, не по часам, а по календарным дням. Для реализации такой возможности в пользовательскую функцию определения времени полного цикла изготовления изделий необходимо ввести продолжительности рабочего дня для каждого из звеньев временной цепи. Для этого в процедурной модели были введены следующие коэффициенты: $K_{hT3Dmod}$ - время создания электронных 3D моделей изделий ($K_{hT3Dmod}$ = 8 час.); K_{hTForm} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания, K_{hTForm} = 24 час.); K_{hTPP1} , K_{hTPP2} , K_{hTPP3} - продолжительность постпроцессов соответствовала 8 час.

Приведенные значения коэффициентов отражают структуру работ, сложившуюся в ЗАО «Верификационные модели» (г. Харьков), и могут при необходимости изменяться.

Статистическое прогнозирование времени полного цикла изготовления изделий в системе моделирования рабочих процессов интегрированных технологий обеспечивалось вариантом расчетов с определением набора абсолютных и относительных характеристик (вариант расчетов соответствует значению субпараметра в процедурной модели nSub = 5): $T_{SigmaDay}$ - время

104

полного цикла, дн.; T_{Form} - общее время формообразования на установке, час; $T_{Form} / K_{hTForm} / T_{SigmaDay}$ - относительное общее время формообразования на установке; $T_{3Dmod} / K_{hT3Dmod} / T_{SigmaDay}$ - относительное время создания электронных 3D моделей изделий; $T_{PP1} / K_{hTPP1} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 1; $T_{PP2} / K_{hTPP2} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2; $T_{PP3} / K_{hTPP3} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2; $T_{PP3} / K_{hTPP3} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2; $T_{PP3} / K_{hTPP3} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2.

До внедрения разработанной системы статистического прогнозирования сроков полного цикла изготовления изделий в ЗАО «Верификационные модели» осуществлялась несколькими приближенными способами:

- В случае отсутствия электронной модели заказываемых изделий: сопоставлением геометрических параметров изделий с параметрами ранее выполнявшихся и назначения времени изготовления по аналогии, фактически без учета конкретных особенностей предстоящей работы; имитацией построения приближенной электронной модели будущего изделия и расчета технологического времени формообразования изделий программного обеспечения, с помощью входящего В комплект программного обеспечения быстрого прикладного установок прототипирования;
- При наличии электронной модели заказываемого изделия расчет технологического формообразования осуществлялся времени при обеспечения программного установок быстрого помощи прототипирования. Расчет времени быстрого на установках прототипирования может осуществляться только в случае, если машина не выполняет задачу по построению, т.е. для расчета фактически используется машинное время.

В перечисленных случаях производился расчет только технологического времени формообразования изделия на установках быстрого прототипирования. Время полного цикла изготовления изделий, включающее время на подготовку процесса и время на постпроцессы не рассчитывалось, а задавалось априори детерминированным.

Примеры использования разработанной методология статистического прогнозирования при анализе временных цепей полного цикла изготовления изделий лазерной стереолитографией (SLA) при единичных заказах представлены ниже.

5.2. Корпус видеомодуля

ООО «Экта-Лиметед» (г. Житомир) занимается проектированием и изготовлением крупногабаритных видеопанно. До последнего времени заказы

размещались на установках лазерной стереолитографии первого поколения (г. Москва) или выполнялись с помощью традиционных технологий механической обработки. Стереолитографические установки первого поколения имеют размер стола 250×250 мм, что является ограничением при выполнении крупногабаритных деталей, кроме этого, дешевизна изготовления (установки эксплуатируются более 12 лет) нивелируется после прохождения изделиями таможни. Поэтому заказы стали размещать В ЗАО «Верификационные модели».

При прогнозировании полного цикла изготовления корпуса видеомодуля параметры имели следующие типы и значения, представленные в табл. 5.1.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 5.1. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 3.87÷8.21 дн. и имеет среднеарифметическое значение 5.798 дн. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 72% от исходного - 3.87÷7 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.5%.

Результаты статистического прогнозирования общего времени формообразования на установке SLA представлены на рис. 5.2. Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 7.01÷29.7 час. и имеет среднеарифметическое значение 14.66 час. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 62% от исходного - 7.01÷21.07 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.4%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 5.2 приведены результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Корпус видеомодуля (рис. 5.3) в ЗАО «Верификационные модели» изготавливался по технологии лазерной стереолитографии на установке SLA-5000 с точностью ±0.1 мм на максимальных размерах, а в отдельных местах (координаты отверстий) с точностью ±0.05мм, что при такой ажурной конфигурации изделия являлось проблемой для традиционных способов обработки.

Таблица 5.1 – Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления корпуса видеомодуля (SLA)

Об.	Типы и значения параметров
T _{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - стохастический нечеткий
	параметр Par1: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.600 \text{ E1}, X_{mod} = 1.800 \text{ E1}, X_{max} =$
	3.200 E1)
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 - стохастический нечеткий параметр
	Par3: распределение $Trapez(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{mod1} = 2.000 \text{ E0}, X_{mod2} =$
	4.000 E0, $X_{max} = 5.000$ E0)
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - детерминированный параметр Par4:
	значение 0.000 Е0
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический нечеткий параметр
	Par5: распределение $Rand(x, X_{min} = 9.000 \text{ E0}, X_{max} = 2.400 \text{ E1})$
T _{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6: распределение
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси У -
	детерминированный параметр Par8: значение 3.500 E2
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z -
	детерминированный параметр Par9: значение 7.000 E1
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный
	параметр Par10: значение 1.575 E5
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями -
	стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.500 \text{ E1}, X_{max} =$
	0.200 E0)
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси У - стохастический
	параметр Par12: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.600 \text{ E0}, X_{max} = 0.700 \text{ E0})$
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастический параметр Par13:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 \text{ E0}, X_{max} = 0.270 \text{ E0})$
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Par14: распределение Rand(x,
	$X_{min} = 3.000 \text{ E3}, X_{max} = 5.000 \text{ E3})$
h_C	толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр
	Par15: значение 0.150 Е0

продолжение табл. 5.1

Об.	Типы и значения параметров
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический
	параметр Par16: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.000 \text{ E0}, X_{max} = 2.000 \text{ E0})$
H_A	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов -
	стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 \text{ EO}, X_{max})$
	= 9.000 E0)
K _{AB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов -
	стохастический параметр Par18: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.300 \text{ E0}, X_{max})$
	= 0.500 E0)
K_{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных
	технологических элементов - детерминированный параметр Par19: значение
	1.000 E0
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий -
	стохастический нечеткий параметр Par20: распределение $Triang(x, X_{min} =$
	1.000 E2, $X_{mod} = 0.150$ E0, $X_{max} = 0.200$ E0)
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических
	элементов - стохастический параметр Par21: распределение $Rand(x, X_{min} =$
	8.000 E0, $X_{max} = 1.000$ E1)
V_P	скорость опускания рабочей платформы - стохастический нечеткий
	параметр Par22: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 \text{ EO}, X_{mod} = 2.000 \text{ EO}, X_{max}$
	= 3.000 E0)
L_C	длина подвода-перебега выравнивающего элемента установки -
	стохастический нечеткий параметр Par23: распределение $TriangRight(x, X_{min})$
* 7	$= 5.000 \text{ EO}, X_{max} = 7.000 \text{ EO})$
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки -
	стохастический нечеткий параметр Par24: распределение $TriangLeft(x, X_{min} = 1.200 \ \text{F1}, X_{min} = 1.500 \ \text{F1})$
V	$1.200 \text{ E1}, X_{max} = 1.500 \text{ E1})$
K _{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при
	построении изделии - стохастический нечеткий параметр Раг 25 :
	распределение <i>TriangLeji</i> (x , $x_{min} = 1.000$ E0, $x_{max} = 2.000$ E0)
I _{WD}	время выдержки при построении изделии - стохастическии нечеткии построении $Triang(r, X) = 1,000$ E1 X = 1,200 E1 X
	параметр Рагго. распределение $Triang(x, x_{min} = 1.000 \text{ E1}, x_{mod} = 1.200 \text{ E1}, x_{max}$ = 1.500 E1);
T	
I AD	время выдержки при построении технологических элементов - стоурстинеский ненеткий параметр Dar27: распроизологиис <i>Triana(r V</i> –
	стохастический нечеткий параметр Fai27. распределение $Triang(x, X_{min} = 6000 E0, Y_{min} = 1,000 E0, Y_{min} = 1,000 E1)$
	0.000 E0, $A_{mod} = 7.000$ E0, $A_{max} = 1.000$ E1)


Рисунок 5.1 – Экранная форма с результатами прогнозирования времени полного цикла создания корпуса видеомодуля



Таблица 5.2 - Сравнительные результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания корпуса видеомодуля (SLA)

Обозн	Ед.	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
$T_{3D mod}$	час	3D модель	$Triang(x, X_{min} = 16, X_{mod} = 18, X_{max} = 32)$	24
T _{Form}	час	формобр. SLA	7÷21 при уровне риска 5.4%	16
T_{PP1}	час	постпроцесс 1	$Trapez(x, X_{min} = 1, X_{mod1} = 2, X_{mod2} = 4, X_{max} =$	3
			5);	
T_{PP2}	час	постпроцесс 2	0	—
T_{PP3}	час	постпроцесс 3	$Rand(x, X_{min} = 9, X_{max} = 24)$	16
T _{Sigma}	дн.	полный цикл	3.9÷7 при уровне риска 5.5%	7.1

Время изготовления при использовании традиционных технологий составляло около двух месяцев при отсутствии гарантий по качеству и точности изготовления, а также при крайне низком коэффициенте использования материала.

Применение лазерной стереолитографии позволило снять проблемы точности и скорости изготовления, однако у заказчика осталась проблема достаточно высокой стоимости.

5.2. Панель инструментов стоматологической установки

Панель инструментов стоматологической установки (рис. 5.4) требовалось спроектировать и изготовить для ООО «Галит» (г. Тернополь). Фирма специализируется на разработке и изготовлении опытного оборудования для медицины. До этого фирма работала с Италией, где и делали опытные образцы новых разработок, однако ее лимитировала стоимость работ. Делались попытки изготовления собственными силами с применением технологии послойной склейки стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Не устроил внешний вид и качество. Построение оснастки для прессования на термопластавтоматах нецелесообразно из-за единичного характера производства. Изготовление по традиционной технологии фрезерования на станках с ЧПУ требует разработки управляющих программ (затраты времени до месяца) и связано с крайне низким коэффициентом использования материала.

При прогнозировании полного цикла изготовления панели инструментов стоматологической установки параметры имели следующие типы и значения, представленные в табл. 5.3.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 5.5. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 3.7÷7 дн. и имеет



Рисунок 5.3 – Корпус видеомодуля (ООО "Экта-Лиметед" г. Житомир), созданный на установке лазерной стереолитографии (SLA)



Рисунок 5.4 – Панель инструментов стоматологической установки (ООО "Галит" г. Тернополь), созданная на установке лазерной стереолитографии (SLA)

Таблица 5.3 - Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления панели инструментов стоматологической установки (SLA)

Об.	Типы и значения параметров	
T _{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - стохастический	
	нечеткий параметр Par1: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 1.600 \text{ E1}, X_{mod} =$	
	1.800 E1, $X_{max} = 3.200$ E1)	
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 - стохастический нечеткий параметр	
	Par3: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{mod} = 2.000 \text{ E0}, X_{max} =$	
	5.000 E0)	
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - детерминированный параметр Par4:	
	значение 0.000 Е0	
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический нечеткий параметр	
	Par5: распределение $Rand(x, X_{min} = 9.000 \text{ E0}, X_{max} = 1.600 \text{ E1})$	
T _{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6: распределение	
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$	
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение	
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$	
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси Y -	
	детерминированный параметр Par8: значение 3.600 Е2	
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z -	
	детерминированный параметр Par9: значение 6.000 E1	
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный	
	параметр Par10: значение 1.296 Е5	
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями -	
	стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.500 \text{ E1}, X_{max})$	
	= 1.000 E1	
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси У - стохастический	
	параметр Par12: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.200 \text{ E0}, X_{max} = 0.300 \text{ E0})$	
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастический параметр Par13:	
	распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 \text{ E0}, X_{max} = 0.270 \text{ E0})$	
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Par14: распределение	
	$Rand(x, X_{min} = 3.000 \text{ E3}, X_{max} = 5.000 \text{ E3})$	
h_C	толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр	
	Par15: значение 0.150 E0	
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический	
	параметр Par16: распределение $Rand(x, X_{min} = 7.000 \text{ E0}, X_{max} = 9.000 \text{ E0})$	

продолжение табл. 3

Об.	Типы и значения параметров
H_A	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов -
	стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 \text{ EO}, X_{max})$
	= 9.000 E0)
K_{AB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов -
	стохастический параметр Par18: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.300 \text{ E0}, X_{max})$
	= 0.500 E0)
K_{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных
	технологических элементов - детерминированный параметр Par19: значение
	1.000 E0
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий -
	стохастический нечеткий параметр Par20: распределение $Triang(x, X_{min} =$
	$1.000 \text{ E2}, X_{mod} = 0.150 \text{ E0}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических
	элементов - стохастический параметр Par21: распределение $Rand(x, X_{min} =$
	8.000 E0, $X_{max} = 1.000$ E1)
V_P	скорость опускания рабочей платформы - стохастический нечеткий
	параметр Par22: распределение $Triang(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{mod} = 2.000 \text{ E0}, X_{max}$
-	= 3.000 E0)
L_C	подвода-перебега выравнивающего элемента установки - стохастический
	нечеткий параметр Par23: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 5.000 \text{ EO}, X_{max})$
17	= 7.000 E0)
V _C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки -
	стохастический нечеткий параметр Par24: распределение $TriangLeft(x, X_{min} = 1.200 \text{ E1}, X_{min} = 1.500 \text{ E1})$
V	$1.200 \text{ E1}, A_{max} = 1.500 \text{ E1})$
\mathbf{K}_{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при
	построении изделии - стохастический нечеткий параметр Pai25.
	распределение $IntangLeft(x, X_{min} - 1.000 EO, X_{max} - 2.000 EO)$
I WD	время выдержки при построении изделии - стохастическии нечеткии нараметр Par_26 : расправление Triang(x X = 1,000 E1, X = 1,200 E1, X
	-1.800 F1
AD	стохастический нечеткий параметр Par27 распределение Triang(r X . –
	6000FOX = 7 000 FO X = 1 000 F1)
	$1.000 \text{ Eo}, m_{mod} = 1.000 \text{ Eo}, m_{max} = 1.000 \text{ EI})$

среднеарифметическое значение 5 дн. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 71% от исходного - 3.7÷6.1 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.1%.

Результаты статистического прогнозирования общего времени формообразования на установке SLA представлены на рис. 5.6.



Рисунок 5.5 – Экранная форма с результатами прогнозирования полного цикла создания панели инструментов стоматологической установки



Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 7.6÷22.6 час. и имеет среднеарифметическое значение 13.03 час. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 65% от исходного - 7.6÷17.4 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 5.4 приведены результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Панель инструментов стоматологической установки в ЗАО «Верификационные модели» изготавливалась по технологии лазерной стереолитографии на установке (SLA). Применение лазерной стереолитографии снизило время изготовления при обеспечении требуемого качества и точности.

Таблица 4 - Сравнительные результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания панели инструментов стоматологической установки (SLA)

Обозн	Ед.	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
$T_{3D mod}$	час	3D модель	$TrapezRight(x, X_{min} = 16, X_{mod} = 18, X_{max} =$	32
			32)	
T _{Form}	час	формобр. SLA	7.6÷17.4 при уровне риска 5%	14.6
T_{PP1}	час	постпроцесс 1	$TrapezRight(x, X_{min} = 1, X_{mod} = 2, X_{max} = 5)$	5
T_{PP2}	час	постпроцесс 2	0	
T_{PP3}	час	постпроцесс 3	$Rand(x, X_{min} = 9, X_{max} = 16)$	16
T _{Sigma}	дн.	полный цикл	3.7÷6.1 при уровне риска 5.1%	7

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование статистического прогнозирования для решения задач расчета временных цепей при создании изделий методом лазерной стереолитографии является эффективным инструментом анализа существующих и проектируемых рабочих процессов. Разработанная система статистического моделирования обеспечивает возможность оценки рисков выполнения проектов по созданию изделий в заданные сроки, что способствует заключению экономически обоснованных контрактов.

Список литературы к разделу 5

- Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Г. Основы математического моделирования технических систем: Учеб. пос. - Брянск: БГТУ, 2004. -271 с.
- Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2000. - 352 с.
- Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. -М.: Машиностроение, 2005. - 736 с.
- Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Абдурайимов Л.Н. Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - Вип. 1(12). - С. 3-16.
- 5. Джекел П. Применение методов Монте-Карло в финансах: Пер. с англ. М.: Интернет-трейдинг, 2004. 256 с.
- 6. Дубров А.М., Лагоша Б.А., Хрусталев Е.Ю. Моделирование рисковых ситуации в экономике и бизнесе: Учеб. пособие / Под ред. Б.А. Лагоши.
 М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
- 7. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.
- 8. Недосекин А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. Л.: Санкт-Петербург, 2002. 181 с.
- 9. Орлов А.И. Высокие статистические технологии // Заводская лаборатория. 2003. Т.69. № 11. С. 55-60.
- 10. Орлов А.И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. 1996. Т.
 62. № 1. С. 54-60.
- 11. Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б., Гаращенко Я.Н. Обобщенная модель технологического времени генеративных технологий макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ". 2006. Вип. 1(12). С. 537-551.

6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПОЛНОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

Введение

Рассмотрены вопросы статистического прогнозирования при анализе временных цепей полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня. Приведены примеры практической реализации разработанных подходов, обеспечивающих повышение эффективности использования селективного лазерного спекания (SLS) за счет снижения уровня рисков при выполнении проектов по ее реализации.

6.1. Полный цикл создания изделий генеративными технологиями макроуровня

Полный цикл создания изделий $T_{\Sigma}(T_{Sigma})$ генеративными технологиями макроуровня можно представить в виде линейной последовательности периодов:

$$T_{\Sigma} = T_{3Dmod} + T_{Form} + T_{PP1} + T_{PP2} + T_{PP3},$$

где $T_{3D mod}$ - время создания электронных 3D моделей изделий; T_{Form} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания); T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} - времена различных этапов постобработки.

Применительно к технологии селективного лазерного спекания (SLS) могут использоваться следующие постпроцессы:

 T_{PP1} - постпроцесс № 1 - очистка изделий от остаточного порошка; T_{PP2} - постпроцесс № 2 - выжигание полимера, спекание основного материала и инфильтрация оловянистой бронзы при использовании инкапсулированных в полимер частиц металлических порошков (нержавеющая или углеродистая сталь); T_{PP3} - постпроцесс № 3 - слесарная шлифовка, полировка, окраска и пр.

В каждом периоде имеет место процедура эволюции изделия и на каждом ее этапе достигается определенный эволюционный результат: $T_{3D mod}$ - файл (или система файлов) триангуляционного описания 3D моделей изделий (в STL-формате); T_{Form} - послойная материализация 3D моделей, т. е. прямой переход от электронного образа изделия в твердотельное состояние; T_{PP1} , T_{PP2} , T_{PP3} - придание изделиям требуемых эксплуатационных свойств и необходимого потребительского качества.

Полный цикл создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня состоит из ряда закономерно расположенных и находящихся во взаимосвязи периодов (звеньев), представляющих временную

цепь. Понятие временных цепей по аналогии с размерными цепями при решении технологических задач введено Б.М. Базровым [3].

особенностью Основной временных цепей создания изделий интегрированными генеративными технологиями макроуровня является высокий уровень неопределенности значений составляющих звеньев. Это большим числом факторов, влияние связано которых практически С Таким образом, попытки невозможно учесть. использования только детерминированного подхода обречены на неудачу. Одним из перспективных современных подходов к решению задач при системной неопределенности исходных данных является использование нечетких экспертных оценок на базе интервальных, треугольных, трапециевидных и др. чисел [2, 8, 9, 10].

В настоящей работе расчет временных цепей производился методом статистического прогнозирования [1, 5, 6, 7]. Предлагаемый метод объединяет в себе возможности как полной, так и неполной взаимозаменяемости с оценкой доверительной вероятности нахождения значений замыкающего звена в заданном интервале или риска выхода за его границы.

При прогнозировании использовались обобщенные модели полного цикла изготовления изделий [4] и технологического времени генеративных технологий макроуровня [11].

Практическая реализация статистического прогнозирования времени полного цикла изготовления изделий должна выполняться, как правило, не по часам, а по календарным дням. Для реализации такой возможности в пользовательскую функцию определения времени полного цикла изготовления изделий необходимо ввести продолжительности рабочего дня для каждого из звеньев временной цепи. Для этого в процедурной модели были введены следующие коэффициенты: $K_{hT3Dmod}$ - время создания электронных 3D моделей изделий ($K_{hT3Dmod} = 8$ час.); K_{hTForm} - время формообразования изделий (непосредственно на установке послойного выращивания, $K_{hTForm} = 24$ час.); K_{hTPP1} , K_{hTPP2} , K_{hTPP3} - продолжительность постпроцессов соответствовала 8 час.

Приведенные значения коэффициентов отражают структуру работ, сложившуюся в ЗАО «Верификационные модели» (г. Харьков), и могут при необходимости изменяться.

Статистическое прогнозирование времени полного цикла изготовления изделий в системе моделирования рабочих процессов интегрированных технологий обеспечивалось вариантом расчетов с определением набора абсолютных и относительных характеристик (вариант расчетов соответствует значению субпараметра в процедурной модели nSub = 5): $T_{SigmaDay}$ - время полного цикла, дн.; T_{Form} - общее время формообразования на установке, час; $T_{Form} / K_{hTForm} / T_{SigmaDay}$ - относительное общее время формообразования на

установке; $T_{3Dmod} / K_{hT3Dmod} / T_{SigmaDay}$ - относительное время создания электронных 3D моделей изделий; $T_{PP1} / K_{hTPP1} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 1; $T_{PP2} / K_{hTPP2} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2; $T_{PP3} / K_{hTPP3} / T_{SigmaDay}$ - относительная продолжительность постпроцесса № 2.

Примеры использования разработанной методология статистического прогнозирования при анализе временных цепей полного цикла изготовления изделий селективным лазерным спеканием (SLS) при единичных заказах представлены ниже.

6.2. Корпуса приборов для создаваемой системы «ГЛОНАСС»

ООО «Навис-Украина» (г. Смела) по заказу ГП «Оризон-Навигация» в течение 2004-2005 г. занималось разработкой новых приборов для вновь создаваемой системы «ГЛОНАСС» (Украина-Россия). По окончанию работ над электронной частью проекта возникла необходимость в срочном изготовлении 25 комплектов корпусных деталей для выполнения различных видов испытаний (лабораторных, натурных и т. д.).

Выполнить задачу с помощью универсальных методов - изготовления оснастки и т. д. не позволяли сроки (испытания должны были быть проведены в декабре-январе 2005-2006 г.). Технология FDM (послойное нанесение ABC-пластика через нагретое сопло) не могла использоваться из-за низких прочностных характеристик материала. Задача усложнялась необходимостью нанесения на внутренних поверхностях корпуса экранирующего медного вакуумного покрытия и окраски всех корпусов. Порошковый полиамид окрашивается только после дополнительной подготовки всех поверхностей (шпаклевки и полировки).

При прогнозировании полного цикла изготовления корпуса приборов параметры имели следующие типы и значения, представленные в табл. 6.1.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 6.1. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 24.72÷34.94 дн. и имеет среднеарифметическое значение 29.65 дн. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 79% от исходного - 24.72÷32.79 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.2%.

Результаты статистического прогнозирования общего времени формообразования на установке SLS представлены на рис. 6.2. Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в

Таблица 6.1 – Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления корпусов приборов для создаваемой системы "ГЛОНАСС" (SLS)

Об.	Типы и значения параметров
T _{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - детерминированный
	параметр Par1: значение 0.000 Е0
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса №1 - стохастический параметр Par3:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 8.000 \text{ E0}, X_{max} = 1.200 \text{ E1})$
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - стохастический параметр Par4:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 6.400 \text{ E1}, X_{max} = 9.600 \text{ E1})$
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический параметр Par5:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 1.200 \text{ E2}, X_{max} = 1.600 \text{ E2})$
T _{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 \text{ E0}, X_{max} = 3.500 \text{ E0})$
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси У -
	детерминированный параметр Par8: значение 2.300 E2
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z - стохастический
	параметр Par9: распределение $Rand(x, X_{min} = 9.000 \text{ E1}, X_{max} = 3.300 \text{ E2})$
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный
	параметр Par10: значение 6.440 Е4
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями -
	стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.200 \text{ E0}, X_{max})$
	= 0.500 E0)
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y - для SLS не
	учитывается
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастический параметр Par13:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 \text{ E0}, X_{max} = 0.270 \text{ E0})$
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Par14: распределение
	$Rand(x, X_{min} = 6.000 \text{ E3}, X_{max} = 8.000 \text{ E3})$
h_C	толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр
	Par15: значение 1.000 Е1
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический
	параметр Par16: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{max} = 2.000 \text{ E0})$
H_A	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов -
	стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 \text{ E0},$
	$X_{max} = 3.500 \text{ E0}$
K _{AB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов -
	детерминированный параметр Par18: значение 1.000 Е0

продолжение табл. 6.1

Об.	Типы и значения параметров
K _{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных
	технологических элементов - детерминированный параметр Par19:
	значение 1.000 ЕО
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий -
	детерминированный параметр Par20: значение 0.000 E0
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических
	элементов - детерминированный параметр Par21: значение 0.000 E0
V_P	скорость опускания рабочей платформы - стохастический параметр Par22:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, \text{ Xmax} = 3.000 \text{ E0})$
L_C	длина рабочего хода выравнивающего элемента установки -
	детерминированный параметр Par23: значение 1.200 ЕЗ
V _C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки -
	стохастический параметр Par24: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 \text{ E2},$
	$X_{max} = 2.600 \text{ E2}$)
K _{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при
	построении изделий - для SLS не учитывается
T_{WD}	время выдержки при построении изделий - стохастический нечеткий
	параметр Par26: распределение $Triang(x, X_{min} = 4.000 \text{ E0}, X_{mod} = 6.000 \text{ E0},$
	$X_{max} = 1.000 \text{ E1}$)
T_{AD}	время выдержки при построении технологических элементов -
	стохастический нечеткий параметр Par27: распределение <i>Triang(x</i> ,
	$X_{min} = 4.000 \text{ E0}, X_{mod} = 6.000 \text{ E0}, X_{max} = 1.000 \text{ E1})$

исходном интервале значений 7.946÷51.39 час. и имеет среднеарифметическое значение 21.63 час. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 61% от исходного - 7.946÷34.45 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.5%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 6.2 приведены результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Изготовление комплекта корпусов для приборов вновь спроектированной навигационной системы GPS/ГЛОНАСС выполнялось на установке избирательного лазерного спекания. Каждый комплект состоял из шести корпусов, изготовленных из стеклонаполненного полиамида (рис. 6.3, 6.4). Рассмотрим выполнение заказа из пяти комплектов.

Время построения пяти комплектов (пятьдесят деталей) и 5 деталей из

Статистические характеристики исследуемого признака - R1 - 0 TSigmaDay - время полного цикла, дней k_{y} x_{min} Минимальное знач. Коэффициент вариации Нач. момент 2-го пор. ma K2M Min CoefVr 2.472121078E+1 6.361607949E-2 8.827106221E+2 β m3 X max Максимальное знач. Коэффициент асимметрии Нач. момент 3-го пор. Max CoefSk K3M 3.493571972E+1 6.151526495E-3 2.638384978E+4 Y E Среднее арифметич. Коэффициент эксцесса mA Нач. момент 4-го пор. Mean CoefEx K4M 2.965050903E+1 -5.883525123E-1 7.917126840E+5 Полигон распределения (в относительных значениях, %) 80 60 40 20 10 20 30 40 50 60 70 0 80 90 100% Доверительная вероятность и риски 🔽 Полигон 3.279 E1 79 ÷ % 0 ÷ % Mean 48.3 % 2.472 E1 Левая граница доверительного интервала Правая граница Mean 2.965 E1 94.8 % 5.2 3.494 E1 Min 2.472 E1 Доверительный интервал Max Вероятность Риски

резиноподобного эластомера составило 18.7 час.

Рисунок 6.1 – Экранная форма с результатами прогнозирования времени полного цикла создания корпусов приборов для системы "ГЛОНАСС"





Рисунок 6.4 – Прессформа для изготовления корпусов приборов системы "ГЛОНАСС" (SLS)

Кроме этого двадцать пять деталей прошли операцию нанесения металлического покрытия на внутренних поверхностях (вакуумное нанесение меди). Все детали прошли постобработку - ручная полировка и нанесение шпаклевки, подготовка поверхностей под окраску и наружная окраска.

Таблица 6.2 – Сравнительные результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания корпусов приборов для создаваемой системы "ГЛОНАСС" (SLS)

Обозн	Ед.	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
$T_{3D mod}$	час	3D модель	0	
T _{Form}	час	формобр. SLS	7.9÷34.4 при уровне риска 5.5%	18.7
T_{PP1}	час	постпроцесс 1	$Rand(x, X_{min} = 8, X_{max} = 12)$	16
T_{PP2}	час	постпроцесс 2	$Rand(x, X_{min} = 64, X_{max} = 96)$	48
T_{PP3}	час	постпроцесс 3	$Rand(x, X_{min} = 120, X_{max} = 160)$	216
T _{Sigma}	дн.	полный цикл	24.7÷32.8 при уровне риска 5.2%	36

6.3. Прессформа для изготовления турбинных лопаток

Работы по изготовлению прессформы для изготовления турбинных лопаток проводились с ЧФ «АЗОТМАШСЕРВИС», специализирующимся на восстановлении работоспособности газотурбинных насосных установок импортного производства.

В данном случае возникла необходимость восстановления лопаток для газоперекачивающей станции производства Японии в сжатые сроки из-за опасности остановки производства крупного химкомбината.

Работы предполагали создание прессформы, предназначенной для получения карбамидной модели с последующим переходом к стальному литью по выплавляемым моделям.

Планировалось решение следующих задач: 3D проектирование прессформы; построение одноместной прессформы с применением технологии селективного лазерного спекания порошка нержавеющей стали с последующей пропиткой бронзой; механическая обработка поверхностей смыкания и ручная полировка пера лопатки.

При прогнозировании времени полного цикла создания прессформы для изготовления турбинных лопаток параметры имели следующие типы и значения, представленные в табл. 6.3.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 6.5. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 12.63÷21.85 дн. и

Таблица 6.3 – Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления прессформы для изготовления турбинных лопаток (SLS)

Об.	Типы и значения параметров	
T _{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - стохастический	
	нечеткий параметр Par1: распределение $Trapez(x, X_{min} = 2.000 \text{ E1},$	
	$X_{mod1} = 2.800 \text{ E1}, X_{mod2} = 3.200 \text{ E1}, X_{max} = 4.000 \text{ E1})$	
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса №1 - стохастический параметр Par3:	
	распределение $Rand(x, X_{min} = 4.000 \text{ E0}, X_{max} = 8.000 \text{ E0})$	
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - стохастический нечеткий параметр	
	Раг4: распределение $Trapez(x, X_{min} = 2.000 \text{ E1}, X_{mod1} = 2.400 \text{ E1},$	
	$X_{mod2} = 2.800 \text{ E1}, X_{max} = 3.200 \text{ E1})$	
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический нечеткий параметр	
	Par5: распределение $TrapezRight(x, X_{min} = 4.800 \text{ E1}, X_{mod} = 6.400 \text{ E1},$	
	$X_{max} = 9.600 \text{ E1}$)	
T _{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6:	
	распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 \text{ E0}, X_{max} = 4.500 \text{ E0})$	
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение	
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$	
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси Y -	
	детерминированный параметр Par8: значение 2.600 E2	
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z -	
	детерминированный параметр Par9: значение 7.000 E1	
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный	
	параметр Par10: значение 6.760 Е4	
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями -	
	стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.700 \text{ EO},$	
TZ	$X_{max} = 0.800 \text{ E0}$	
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y - для SLS не	
D	учитывается	
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастическии параметр Par13:	
IZ.	распределение $Rana(x, X_{min} = 0.230 \text{ EO}, X_{max} = 0.270 \text{ EO})$	
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Раг14: распределение $P_{arr} d(r, Y) = 6000\text{E}2, Y = 8000\text{E}2)$	
h	$Kana(x, X_{min} = 0.000 \text{ ES}, X_{max} = 8.000 \text{ ES})$	
n_C	Толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр	
	Par15: значение 1.000 E1	
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический	
	нечеткий параметр Par16: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0},$	
	$X_{max} = 2.000 \text{ E0}$)	

продолжение табл. 6.3

Об.	Типы и значения параметров	
H_A	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов -	
	стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 \text{ EO},$	
	$X_{max} = 3.500 \text{ E0}$)	
K _{AB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов -	
	детерминированный параметр Par18: значение 1.000 E0	
K _{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных	
	технологических элементов - детерминированный параметр Par19:	
	значение 1.000 ЕО	
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий -	
	детерминированный параметр Par20: значение 0.000 E0	
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических	
	элементов - детерминированный параметр Par21: значение 0.000 E0	
V_P	скорость опускания рабочей платформы - стохастический параметр Par22:	
	распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{max} = 3.000 \text{ E0})$	
L_C	длина рабочего хода выравнивающего элемента установки -	
	детерминированный параметр Par23: значение 1.200 ЕЗ	
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки -	
	стохастический параметр Par24: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.600 \text{ E2},$	
	$X_{max} = 1.900 \text{ E2}$)	
K_{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при	
	построении изделий - для SLS не учитывается	
T_{WD}	время выдержки при построении изделий - стохастический нечеткий	
	параметр Par26: распределение $TriangRight(x, X_{min}) = 4.000 \text{ E0},$	
	$X_{max} = 6.000 \text{ E0}$)	
T_{AD}	время выдержки при построении технологических элементов -	
	стохастический нечеткий параметр Par27: распределение TriangRight(x,	
	$X_{min} = 4.000 \text{ E0}, X_{max} = 6.000 \text{ E0})$	

имеет среднеарифметическое значение 16.49 дн. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 71% от исходного - 12.63÷19.18 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.4%.

Результаты статистического прогнозирования общего времени формообразования на установке SLS представлены на рис. 6.6. Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 9.891÷20.76 час. и имеет среднеарифметическое значение 13.91 час. Установка нового доверительного интервала показывает,



Рисунок 6.5 – Экранная форма с результатами прогнозирования времени полного цикла создания прессформы для изготовления турбинных лопаток



что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 65% от исходного - 9.891÷16.95 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.2%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 6.4 приведены результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Таблица 6.4 - Сравнительные результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания прессформы для изготовления турбинных лопаток (SLS)

Обозн	Ед.	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
$T_{3D mod}$	час	3D модель	$Trapez(x, X_{min} = 20, X_{mod1} = 28, X_{mod2} = 32,$	32
			$X_{max} = 40)$	
T _{Form}	час	формобр. SLS	9.9÷17 при уровне риска 5.2%	12
T_{PP1}	час	постпроцесс 1	$Rand(x, X_{min} = 4, X_{max} = 8)$	6
T_{PP2}	час	постпроцесс 2	$Trapez(x, X_{min} = 20, X_{mod1} = 24, X_{mod2} = 28,$	26
			$X_{max} = 32)$	
T_{PP3}	час	постпроцесс 3	$TrapezRight(x, X_{min} = 48, X_{mod} = 64, X_{max} = 96)$	80
T _{Sigma}	дн.	полный цикл	12.6÷19.2 при уровне риска 5.4%	17

Создание прессформы (рис. 6.7) для производства рабочих лопаток турбины выполнялось по технологии селективного лазерного спекания. Использовался материал ST-100 (нержавеющая сталь с последующей пропиткой бронзой).

6.4. Корпуса катушек для погружных нефтяных насосов

ОАО «Опытно-конструкторское бюро геофизического приборостроения» совместно с ГП «Геофизприбор» конструируют и производят насосы для нефтяных скважин в основном для Западной Сибири. В регионе достаточно высокий уровень конкуренции на данный вид продукции со стороны фирм США и других западных производителей.

Отечественные производители вынуждены постоянно совершенствовать характеристики выпускаемой продукции. Производственный цикл отличается большой динамичностью: в течение 2005 г. трижды вносились конструктивные изменения, а партии выпускаемой продукции составляли всего 30, 50 и 90 шт. Указанный темп внесения изменений в конструкцию детали возможен только в случае применения технологии быстрого прототипирования, а, именно, технологии селективного лазерного спекания порошкового стеклонаполненного полиамида.



Рисунок 6.7 – Прессформа для изготовления турбинных лопаток, созданная на установке селективного лазерного спекания (SLS)



Рисунок 6.10 – Корпус катушки для погружных нефтяных насосов, созданный на установке селективного лазерного спекания (SLS)

Таблица 6.5 – Параметры при прогнозировании полного цикла изготовления корпусов катушек для погружных нефтяных насосов (SLS)

Об.	Типы и значения параметров
T _{3Dmod}	время создания электронных 3D моделей изделий - стохастический
	нечеткий параметр Par1: распределение $Trapez(x, X_{min} = 8.000 \text{ E0},$
	$X_{mod1} = 1.000 \text{ E1}, X_{mod2} = 1.600 \text{ E1}, X_{max} = 2.000 \text{ E1})$
T_{PP1}	продолжительность постпроцесса № 1 - стохастический параметр Par3:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 4.000 \text{ E0}, X_{max} = 8.000 \text{ E0})$
T_{PP2}	продолжительность постпроцесса № 2 - детерминированный параметр
	Par4: значение 0.000 Е0
T_{PP3}	продолжительность постпроцесса № 3 - стохастический нечеткий параметр
	Par5: распределение $Triang(x, X_{min} = 8.000 \text{ E0}, X_{mod} = 1.200 \text{ E1},$
	$X_{max} = 1.600 \text{ E1}$)
T_{Home}	подготовительные операции - стохастический параметр Par6:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 2.500 \text{ E0}, X_{max} = 6.000 \text{ E0})$
T_{End}	заключительные операции - стохастический параметр Par7: распределение
	$Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E1}, X_{max} = 0.200 \text{ E0})$
Y_A	ширина рабочей области, занимаемой изделиями по оси Y -
	детерминированный параметр Par8: значение 2.600 E2
H_W	высота рабочей области, занимаемой изделиями по оси Z -
	детерминированный параметр Par9: значение 8.200 E1
S_A	площадь рабочей области, занимаемой изделиями - детерминированный
	параметр Par10: значение 6.760 Е4
K_S	вероятностный коэффициент заполнения рабочей области изделиями -
	стохастический параметр Par11: распределение $Rand(x, X_{min} = 0.150 \text{ E0},$
**	$X_{max} = 0.350 \text{ E0}$
K_Y	вероятностный коэффициент размера сечения по оси Y - для SLS не
D	учитывается
D_L	диаметр пятна лазерного луча - стохастический параметр Par13:
X 7	распределение $Rand(x, X_{min} = 0.230 \text{ EO}, X_{max} = 0.270 \text{ EO})$
V_L	скорость луча лазера - стохастический параметр Раг14: распределение $P_{res} I(r, Y) = (000 E^2, Y) = 8,000 E^2)$
1.	$Rana(x, X_{min} = 0.000 \text{ E3}, X_{max} = 8.000 \text{ E3})$
n_C	толщина формируемого единичного слоя - детерминированный параметр
	Par15: значение 0.760 E1
K_{WR}	коэффициент проходов луча при построении изделий - стохастический
	нечеткий параметр Par16: распределение $TriangRight(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0},$
	$X_{max} = 2.000 \text{ E0}$)
H_A	высота (по координате Z) дополнительных технологических элементов -
	стохастический параметр Par17: распределение $Rand(x, X_{min} = 2.000 \text{ E0},$
	$X_{max} = 2.500 \text{ E0}$)

продолжение табл. 6.5

Об.	Типы и значения параметров
K _{AB}	коэффициент заполнения дополнительных технологических элементов -
	детерминированный параметр Par18: значение 1.000 Е0
K_{AR}	коэффициент проходов луча при построении дополнительных
	технологических элементов - детерминированный параметр Par19:
	значение 1.000 ЕО
h_{WP}	глубина дополнительного опускания платформы при построении изделий -
	детерминированный параметр Par20: значение 0.000 Е0
h_{AP}	глубина дополнительного опускания при построении технологических
	элементов - детерминированный параметр Par21: значение 0.000 E0
V_P	скорость опускания рабочей платформы - стохастический параметр Par22:
	распределение $Rand(x, X_{min} = 1.000 \text{ E0}, X_{max} = 3.000 \text{ E0})$
L_C	длина рабочего хода выравнивающего элемента установки -
	детерминированный параметр Par23: значение 1.200 ЕЗ
V_C	скорость перемещения выравнивающего элемента установки -
	стохастический параметр Par24: распределение $Rand(x, X_{min} = 1.600 \text{ E2},$
	$X_{max} = 1.900 \text{ E2}$)
K_{WC}	коэффициент числа проходов выравнивающего элемента установки при
	построении изделий - для SLS не учитывается
T_{WD}	время выдержки при построении изделий - стохастический нечеткий
	параметр Par26: распределение $TriangRight(x, X_{min}) = 4.000 \text{ E0},$
	$X_{max} = 6.000 \text{ E0}$)
T_{AD}	время выдержки при построении технологических элементов -
	стохастический нечеткий параметр Par27: распределение TriangRight(x,
	$X_{min} = 4.000 \text{ E0}, X_{max} = 6.000 \text{ E0})$

Подготовка производства с применением классических технологий изготовление прессформ И использование термопластавтоматов нецелесообразна по экономическим и временным ограничениям: изготовление нецелесообразно вследствие меняющейся прессформ номенклатуры И незначительного размера партий; стоимость прессформы составляет 20÷30 тыс. дол. США; время изготовления одной прессформы составляет 3÷3.5 мес. с использованием технологии электроэрозионной обработки.

При прогнозировании полного цикла изготовления корпусов катушек для погружных нефтяных насосов параметры имели следующие типы и значения, представленные в табл. 6.5.

Результаты статистического прогнозирования полного цикла создания изделий представлены на рис. 6.8. Полный цикл создания изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 3.1÷5.9 дн. и имеет



Рисунок 6.8 – Экранная форма с результатами прогнозирования времени полного цикла создания корпусов катушек для погружных нефтяных насосов



среднеарифметическое значение 4.5 дн. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 74% от исходного - 3.1÷5.2 дн. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5.1%.

Результаты статистического прогнозирования обшего времени формообразования на установке SLS представлены на рис. 6.9. Общее время формообразования изделий для заданных условий расчета находится в исходном интервале значений 8÷19 час. и имеет среднеарифметическое значение 12.2 час. Установка нового доверительного интервала показывает, что интервал исследуемого признака можно уменьшить до 63% от исходного -8÷15 час. При этом риски того, что полный цикл создания изделий выйдет за границы установленного интервала, соответствуют 5%.

На базе проведенного статистического прогнозирования был заключен договор на создание этих изделий. В табл. 6.6 приведены результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания изделий.

Таблица 6.6 - Сравнительные результаты статистического прогнозирования временной цепи полного цикла создания корпусов катушек для погружных нефтяных

Обозн	Ед	Наименование	Статистическое прогнозирование	Факт
$T_{3D mod}$	час	3D модель	$Trapez(x, X_{min} = 8, X_{mod1} = 10, X_{mod2} = 16,$	16
			$X_{max} = 20)$	
T _{Form}	час	формобр. SLS	8÷15 при уровне риска 5%	14.7
T_{PP1}	час	постпроцесс 1	$Rand(x, X_{min} = 4, X_{max} = 8)$	8
T_{PP2}	час	постпроцесс 2	0	
T_{PP3}	час	постпроцесс 3	$Triang(x, X_{min} = 8, X_{mod} = 12, X_{max} = 16)$	16
T _{Sigma}	дн.	полный цикл	3.1÷5.9 при уровне риска 5.1%	5.6

насосов	(SLS)
---------	-------

Фактические значения соответствуют заказу в количестве 90 шт. изделий (рис. 6.10).

Заключение

Проведенные исследования показали, что использование статистического прогнозирования для решения задач расчета временных цепей при создании изделий методом селективного лазерного спекания является эффективным инструментом анализа существующих и проектируемых рабочих процессов. Разработанная система статистического моделирования обеспечивает

возможность оценки рисков выполнения проектов по созданию изделий в заданные сроки, что способствует заключению экономически обоснованных контрактов.

Список литературы к разделу 6

- 1. Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Г. Основы математического моделирования технических систем: Учеб. пос. Брянск: БГТУ, 2004. 271 с.
- Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. - Тюмень: Изд-во Тюменского гос. университета, 2000. - 352 с.
- Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. -М.: Машиностроение, 2005. - 736 с.
- 4. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Чернышов С.И., Абдурайимов Л.Н. Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - Вип. 1(12). - С. 3-16.
- 5. Джекел П. Применение методов Монте-Карло в финансах: Пер. с англ. М.: Интернет-трейдинг, 2004. 256 с.
- 6. Дубров А.М., Лагоша Б.А., Хрусталев Е.Ю. Моделирование рисковых ситуации в экономике и бизнесе: Учеб. пособие / Под ред. Б.А. Лагоши.
 М.: Финансы и статистика, 2000. 176 с.
- 7. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука, 1982. 296 с.
- 8. Недосекин А.О. Нечетко-множественный анализ риска фондовых инвестиций. Л.: Санкт-Петербург, 2002. 181 с.
- 9. Орлов А.И. Высокие статистические технологии // Заводская лаборатория. 2003. Т.69. № 11. С. 55-60.
- 10. Орлов А.И. Экспертные оценки // Заводская лаборатория. 1996. Т.
 62. № 1. С. 54-60.
- 11. Чернышов С.И., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б., Гаращенко Я.Н. Обобщенная модель технологического времени генеративных технологий макроуровня // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - Вип. 1(12). - С. 537-551.