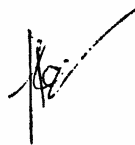


1576483

Московский
государственный технический университет имени
Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ПОГРЕБИНСКИЙ Александр Викторович



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С УЧЕТОМ
РЕАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

05.13.12 - Системы автоматизированного проектирования

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2001

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Жук Д.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Капустин Н.М.
кандидат технических наук,
начальник бюро-главный конструктор
Смирнов А.А.

.Благородова РАН

-157648

~~Погребинский~~

Математическое обеспе-
чение автоматизиро
2001 - 0.00

22.11.06. 30280

К

г. в 16 часов на заседании
12.141.10 при Московском
те имени Н.Э.Баумана по адресу:

ся в библиотеке МГТУ имени

нные печатью, просим высылать

002г.



Иванов С.Р.

№ 181

Объем I п.л.

, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1576483

Погребинский А.В. Математи

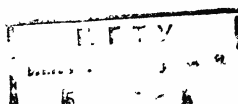
Актуальность проблемы. В настоящее время в различных областях техники и производства возникает проблема исследования влияния погрешностей входных геометрических параметров изделий сложной формы на работоспособность изделий на самых ранних этапах проектирования. В качестве примера можно привести проблему исследования влияния производственных погрешностей формирования поверхностей элементов конструкции, которые приводят к возникновению искажений геометрии объектов производства (ОП) и в итоге влияют на работоспособность изделий.

Игнорирование этих искажений снижает достоверность результатов моделирования кинематики, динамики, нагруженного состояния и иных видов расчетов, проведенных для геометрической модели с номинальными значениями параметров.

1546483
8879451

Необходимость отображения в математической модели объекта производства реальной геометрии прежде всего возникла в высокоответственных областях машиностроения при проектировании прецизионных узлов с высокими требованиями по точности позиционирования и сопряжения. Однако, она имеет приложение и в приборостроении, особенно в вычислительной технике при проектировании механических приводов периферийных устройств, а также в радиоэлектронной промышленности и микроэлектронике. Современные рабочие частоты сигналов в печатных платах требуют учета геометрической формы проводников и параметров окружающих материалов. Это необходимо при анализе распространения сигналов, определении уровня помех, при выполнении теплового и других видов расчетов с учетом реальной геометрии печатных проводников. Проектирование микропроцессоров с современными тактовыми частотами также требует их представления в виде трехмерных геометрических структур, поскольку их свойства существенно зависят от геометрии. Однако, в данный момент состояние отечественной промышленности позволяет избрать в качестве предметной области только проектирование механических устройств, применительно к которому и проводилось диссертационное исследование.

Развивавшаяся в рамках проекционного черчения теория размерных цепей далеко не полностью учитывает пространственные отклонения. Размерные цепи не отражают ни способы создания геометрической мо-



дели средствами САПР, ни формирования поверхностей ОП в процессе механической обработки и контроля его точности современными средствами измерения. В современных условиях требуется дополнить теорию точности достижениями в области машинной графики. Необходимо разработать геометрическую модель ОП, в которой способ формирования геометрического образа ОП согласован со стандартными техническими требованиями, что позволит адекватно отражать и контролировать реальные отклонения в ОП от номинальной геометрии.

Традиционный способ контроля точности ОП прилегающими поверхностями и профилями не обеспечивает адекватной оценки точности. С другой стороны, использование для измерения координатно-измерительных машин требует разработки математического аппарата для интерпретации результатов измерений.

В связи с этим, разработка геометрической модели и математического аппарата, обеспечивающих проектирование с учетом реальных отклонений формы и расположения поверхностей ОП и пригодных для контроля точности, является актуальной задачей.

Целью работы является разработка математического обеспечения автоматизированного проектирования изделий сложной формы с учетом реальной геометрии.

Методы исследования. Результаты работы получены с использованием аппарата теории исследования функций, аналитической геометрии и линейной алгебры, теории матриц, теории квадратичных форм, методов решения систем линейных алгебраических уравнений, численных методов решения нелинейных алгебраических уравнений высоких порядков, параметрической оптимизации, теории вероятностей и математической статистики, теории информации.

Научная новизна. В работе получены новые научные результаты:

- разработана геометрическая модель, адекватно отображающая пространственные искажения геометрии поверхностей объекта производства, обусловленные ограниченной точностью изготовления;
- предложена методика построения распределений отклонений выходных геометрических параметров объекта производства с учетом реальных отклонений формы и расположения его поверхностей на базе статистического моделирования, позволяющая, в частности, моделировать распределение масс-инерционных характеристик и решать задачу расчета допусков при перебазировании;

- дано определение отсчетной поверхности как математического эквивалента реальной поверхности, заданной своими точками; обоснован выбор в качестве отсчетных средних или номинальных поверхностей в зависимости от формы поверхности;
- разработаны алгоритмы, позволяющие в рамках геометрической модели, используемой при проектировании, выполнять оценку соответствия выходных геометрических параметров номинальным значениям, заданным в конструкторской документации.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- разработаны инструментальные средства создания геометрических моделей объектов производства с учетом пространственных искажений геометрии, реализующие предложенную методику;
- работоспособность предложенной методики и инструментальных средств подтверждается проведенным математическим экспериментом по моделированию точности выходных геометрических параметров ОП в зависимости от допусков на управляемые параметры на примере расчета геометрии масс;
- найдено отображение отклонений формы и расположения поверхностей, задаваемых согласно ГОСТ 24642-81, в значения управляемых параметров геометрической модели;
- предложено и исследовано решение задачи размещения отсчетных поверхностей, заданных аналитическим уравнением первого и второго порядка в массиве точек реальных поверхностей, исходя из критерия минимума среднеквадратичного отклонения;
- разработанные алгоритмы реализованы в виде пакета прикладных программ для решения задачи контроля точности выходных геометрических параметров ОП, ограниченных каноническими поверхностями, по результатам измерения на координатно-измерительных машинах.

Реализация результатов работы в промышленности. Разработанная методика анализа и контроля точности, а также реализующее ее программное обеспечение и методика его использования внедрены в САПР MicroStation95 компании Bentley Systems Inc. и ADEM версии 6.2 компании "Омега Технолоджиз Лтд."

Апробация работы. Содержание диссертации было доложено:

- на семинарах и заседаниях кафедры "Системы автоматизированного проектирования" МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 1998 - 2000 г.;

- на 6-й всероссийской научно-технической конференции "Состояние и проблемы измерений", Москва, 1999 г.
- на научно-технической конференции "170 лет МГТУ им. Н.Э.Баумана", Москва, 2000 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в шести печатных работах.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 193 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 22 таблицы, список литературы и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы. Указывается логическая связь отдельных глав диссертации.

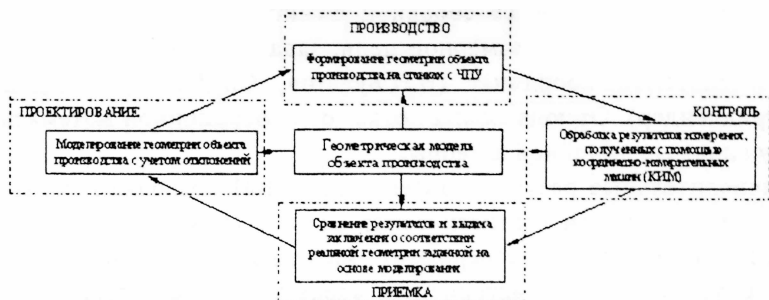
В главе 1 рассмотрены методы анализа и контроля точности ОП применительно к САПР. Проанализированы проблемы построения математических моделей пространственных размерных цепей и перспективные методы их решения. Сформулированы требования к геометрическим моделям САПР, выполнение которых необходимо для адекватного анализа точности. Рассмотрена существующая методика контроля точности, ее недостатки и способы их преодоления.

Показано, что среди этапов проектирования наименее обеспечен средствами автоматизации этап технического проекта, на котором выбираются, моделируются и назначаются рациональные допуски на управляемые параметры, обеспечивающие работоспособность проектируемой машины и полноту сборочной взаимозаменяемости. Все расчеты в САПР проводятся по номинальной геометрической модели. Не производится оценка влияния отклонений геометрических параметров на функционирование проектируемой машины.

На основании вышесказанного сделан вывод, что геометрическая модель ОП должна включать и технологическую информацию, то есть представлять конструктивно-технологический модуль, допускающий использование на всем производственном цикле, включая проектирование, изготовление и контроль.

Сосредоточение конструкторской и технологической информации в математической модели элемента конструкции отвечает наметившейся

в САПР концепции объектно-ориентированного проектирования, когда объект включает в себя (инкапсулирует) всю необходимую для работы с ним информацию (атрибуты и правила их обработки).



Использование единой геометрической модели в сквозном производственном цикле

Дан обзор методов анализа точности, базирующихся на теории размерных цепей (Н.А.Бородачев, Н.Г.Бруевич, В.П.Пузанова). Недостатками аналитических методов являются: требование к аналитическому виду уравнения связи звеньев размерной цепи, наличие погрешности вычисления коэффициентов влияния методом линеаризации. Коэффициенты влияния не могут быть вычислены при нулевых номинальных значениях звеньев. Метод наихудшего случая (И.С.Солонин, С.И.Солонин) используется только для предельных оценок, хотя и гарантирует попадание отклонения в рассчитанный интервал. Теоретико-вероятностным методом (П.Ф.Дунаев) затруднено вычисление отклонения замыкающего звена при законах распределения составляющих звеньев, отличных от нормального. Используемые формулы требуют знания законов распределения отклонений, обеспечивают приемлемую точность лишь при малой нелинейности уравнения связи. В САПР этот метод не применяется.

Основная проблема анализа точности, проводимого с учетом пространственных искажений ОП, заключается в составлении уравнения пространственной размерной цепи. Развивавшийся в рамках проекционного черчения, аппарат теории размерных цепей не позволяет учитывать пространственные искажения ОП и не согласуется со стандартом допусков на отклонение формы и расположение поверхностей. Современные САПР обладают трехмерным графическим ядром, позволяющим создавать объемные образы ОП, однако при анализе точности ис-

пользуются традиционные методы.

Проблема анализа точности сформулирована, как задача исследования влияния отклонений параметров положения поверхностей ОП на их взаимодействие в процессе сборки и функционирования. Положение поверхности, как звена размерной цепи, задается не связанным вектором, а системой координат (В.П.Булатов, С.В.Исаев, Л.А.Кашуба, И.Г.Фридлендер). Отсюда следует отказ от проекционной математики в пользу аппарата линейной алгебры.

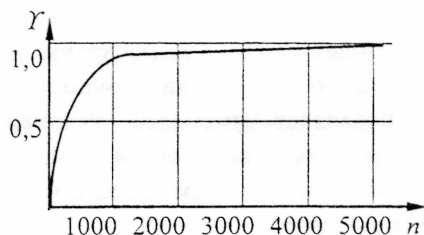
Вычислительные ресурсы современных ЭВМ позволяют применять для анализа точности статистические методы (И.М.Соболь), которые заменяют физический эксперимент математическим исследованием системы уравнений или алгоритмов, адекватно описывающих изучаемые физические системы или явления. Разработка метода сводится к построению математической модели одной реализации (в задаче анализа точности - размерной цепи), выбору закона распределения отклонений управляемых параметров и определения минимального числа реализаций для получения распределений выходных параметров с доверительной вероятностью P_0 и статистической надежностью γ .

В качестве математической модели одной реализации предложено рассматривать геометрическую модель ОП, управляемые параметры которой обеспечивают адекватное отображение реальных искажений геометрии ОП, имеющих взаимно-однозначное соответствие допускам на отклонение формы, расположения и размеров поверхностей ОП.

На практике законы распределения обычно неизвестны, поскольку зависят от множества трудно поддающихся учету факторов. Реальные распределения могут быть заменены близкими к ним модельными, имеющими максимальный доверительный интервал среди всех распределений с теми же параметрами (Л.А.Кашуба, М.Ф.Росин, К.Шеннон). В качестве модельных выбирается распределение:

- равновероятностное, если заданы границы диапазона рассеяния;
- экспоненциальное, если дано математическое ожидание, доверительная вероятность P_0 и распределение одностороннее;
- нормальное, если дано математическое ожидание, доверительная вероятность P_0 и распределение двустороннее.

Минимальное число реализаций n определяется на основе непараметрических толерантных интервалов (И.В.Дунин-Барковский, А.В.Смирнов). Для двусторонних интервалов $n \cdot P_0^{(n-1)} - (n-1) \cdot P_0^n < 1 - \gamma$, односторонних $P_0^n < 1 - \gamma$. Графически эта зависимость имеет вид



Рассмотрены недостатки методики контроля точности ОП прилегающими профилями и поверхностями из-за неоднозначности критерия минимума максимального отклонения, невозможности разделения отклонений формы и расположения, сложности позиционирования аппроксимирующих поверхностей и необходимости назначения допусков на их параметры. Последнее относится и к аппроксимации реальных поверхностей средними. Показано, что использование для контроля точности координатно-измерительных машин позволяет перейти от физического способа оценки точности к теоретическому, используя математический эквивалент реальной поверхности. Рассмотрены подходы в существующих САПР к восстановлению реальной геометрии ОП по измеренным точкам, показано, что оценивать точность ОП необходимо по каждой поверхности независимо.

На основании проведенного анализа и в соответствии с указанной целью работы сформулированы следующие задачи исследования:

- выбрать пространство управляемых параметров геометрической модели объекта производства, адекватно отображающих пространственные искажения по сравнению с его номинальной моделью;
- выполнить отображение случайных отклонений формы и расположения поверхностей объекта производства в значения управляемых параметров в процессе моделирования;
- дать определение математического эквивалента объекта производства, заданного координатами точек реальных поверхностей на этапе контроля точности выходных параметров.
- разработать пакеты программ анализа и контроля точности для проведения математического эксперимента по моделированию;
- осуществить на основе предлагаемой геометрической модели моделирование компонентов геометрии масс и вычислительный эксперимент по проверке предложенного алгоритма контроля точности;
- реализовать разработанные инструментальные средства в промышленности.

В главе 2 рассмотрены методы создания геометрических моделей, применяемые в современных САПР, с точки зрения их пригодности для анализа точности. Показано, что анализ точности на основе теории размерных цепей не позволяет учитывать отклонения формы и пространственного расположения поверхностей. При решении задачи назначения допусков не реализованы возможности САПР, как инструмента трехмерного проектирования.

Для полного и адекватного исследования точности ОП в зависимости от допусков на составляющие его поверхности геометрическая модель должна обеспечивать на стадии технического проекта возможность управления положением и формой каждой поверхности с целью назначения на них технических требований, что не реализовано в существующих САПР. Искажение геометрии характеризуется отклонением параметров поверхностей от номинальных значений. Параметры положения поверхности определяются параметрами связанной с ней СК (СКП), а форма - математической моделью. Представление поверхности как конструктивно-технологического модуля, являющегося элементарной единицей проектирования названо статусом.

Атрибуты, определяющие номинальную геометрию поверхности:

- имя библиотеки, в которой хранятся математические модели поверхностей в нормированном масштабе;
 - вид поверхности, задаваемой аналитически или координатами опорных точек и правилами интерполирования;
 - идентификатор экземпляра поверхности данного вида;
 - масштабные коэффициенты конкретной поверхности по отношению к нормированным размерам соответствующего библиотечного элемента, трактуемые, как номинальные значения размеров;
 - номинальные параметры положения СКП в базовой СК проекта;
- Атрибуты, определяющие технические требования к поверхности:
- погрешности и закон распределения масштабов по осям координат;
 - погрешности положения СКП и закон их распределения;
 - отклонение формы;
 - шероховатость поверхности.

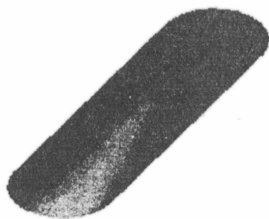
Выражение допусков расположения поверхностей через допуски на параметры СКП представлено в Приложении 1.

Большинство САПР формируют твердотельную геометрию методом В-гер, в котором хранится результирующее состояние геометрической модели. Модель образуется своими гранями. Грани пересекаются по

ребрам, которые сопрягаются в вершинах. В-гер модель представляет собой топологическое дерево инцидентности и соподчиненности граней, ребер и вершин.

Описанная структура В-гер-модели является внутренним представлением геометрической модели ОП в САПР, скрытым от пользователя. Конструктор оперирует моделью, как единым телом и не имеет доступа к отдельным поверхностям. Из этого сделан вывод, что метод В-гер может быть использован для адекватного отображения реальной геометрии ОП при наличии в САПР инструментальных средств управления параметрами отдельных поверхностей геометрической модели ОП - формой (математической моделью), размерами и расположением.

Изменяя параметры поверхностей, например, нормали торцовых плоскостей по отношению к нормали цилиндра, можно вносить искажения в геометрию цилиндра как единого тела, которые можно трактовать как отклонение от перпендикулярности торцовых плоскостей по отношению к оси цилиндра. Величина отклонения определяется углом между нормалью и осью. Можно задать отклонение от параллельности торцовых плоскостей как угла между нормальями. Так на основе единого математического описания поверхностей цилиндра получены различные отклонения расположения.



Цилиндр, ось которого не перпендикулярна основанию

В процессе проектирования ОП и технологии его изготовления может оказаться удобным представлять координаты относительно поверхности, СК которой не совпадает с СК тела. Изменение базиса требует преобразования не только номинальных значений параметров, но и допусков на их отклонения. Пусть допуск на параметр P СК $Ox_1y_1z_1$ задан в СК $Ox_0y_0z_0$: $\delta P_{10} = (P_{10})_{\max} - (P_{10})_{\min}$. Если выразить предельные отклонения P в СК $Ox_2y_2z_2$: $(P_{10})_{\max} \rightarrow (P_{12})_{\max}$, $(P_{10})_{\min} \rightarrow (P_{12})_{\min}$, то $\delta P_{12} = (P_{12})_{\max} - (P_{12})_{\min}$. Однако СК $Ox_2y_2z_2$ имеет собственную погрешность расположения в СК $Ox_0y_0z_0$. Невозможно получить выражение преобра-

зования допусков из-за случайного характера положения одного базиса в другом. Задача может быть решена при использовании статистического моделирования. В каждой реализации известно случайное положение всех СК, в том числе и той, которую требуется принять за базовую. Поэтому можно вычислить текущие случайные параметры любой СК относительно произвольно заданного базиса $Ox_2y_2z_2$, имеющего текущее случайное положение в базисе $Ox_0y_0z_0$.

Глава 3 посвящена разработке алгоритмов определения точности геометрических параметров ОП по координатам измеренных точек реальных поверхностей (РП). Рассмотрена постановка и решение задачи оптимального размещения отсчетных поверхностей в массиве точек реальных поверхностей (РП), исходя из критерия минимума среднеквадратичного отклонения.

При обработке результатов измерения основной задачей является построение математического эквивалента РП, который будем называть отсчетной поверхностью, для оценки степени соответствия найденных параметров заданным номинальным значениям. Для канонических поверхностей предлагается использовать средние поверхности, размещаемые из условия минимума среднеквадратичного отклонения, а для каркасных - номинальные поверхности, чтобы избежать необходимости назначать допуски на все параметры поверхности.

В общем случае размещение отсчетной поверхности $F(x, y, z) = 0$ заключается в поиске вектора R_n начала отсчета и матрицы вращения A_n СКП, обеспечивающих ее оптимальное положение в заданном массиве точек, исходя из минимума среднеквадратичного отклонения точек РП $M_{pi}(x_{poi}, y_{poi}, z_{poi})$, $i = 1, \dots, k$ от ближайших к ним точек отсчетной поверхности $M_{oi}(x_{oi}, y_{oi}, z_{oi})$:

$$\frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \varepsilon_i^2 \Rightarrow \min, \varepsilon_i = [(x_{oi} - x_{poi})^2 + (y_{oi} - y_{poi})^2 + (z_{oi} - z_{poi})^2]^{0.5}.$$

На каждом j -м шаге $(\varepsilon_{ij}) \Rightarrow \min$, при условии $F(x_{oij}, y_{oij}, z_{oij}) = 0$.

В данной диссертационной работе рассматриваются только канонические поверхности первого и второго порядка. Этот класс охватывает подавляющее число поверхностей, встречающихся в машиностроении, при этом такое ограничение допускает решение без применения поисковых методов.

Поиск оптимального положения аналитической поверхности первого и второго порядка в множестве заданных точек включает:

1) Нахождение уравнения поверхности методом наименьших квадратов с решением СЛАУ методами Гаусса или квадратного корня. Неоднородность СЛАУ обеспечивается нормированием матрицы коэффициентов G по элементу $G(p, q)$ с ненулевым минором:

$$G(i + CInt((i + 1) \setminus (p + 1)) / ((i + 1) / (p + 1)), \\ j + CInt((j + 1) \setminus (q + 1)) / ((j + 1) / (q + 1))) / G(p, q).$$

2) Определение параметров поверхности по ее уравнению выполняется по матрице вращения, которая для поверхностей второго порядка находится приведением квадратичной формы к каноническому виду.

Разработан обобщенный алгоритм, который включает нахождение собственных чисел λ матрицы квадратичной формы A , как корней характеристического уравнения $\det(A - \lambda \cdot E) = 0$, имеющего вид приведенного кубического уравнения $\lambda^3 + b \cdot \lambda^2 + c \cdot \lambda + d = 0$. Для его численного решения предложен эффективный алгоритм на основе анализа аналитического решения и исследования кубической функции.

Собственные векторы $f_k = (x, y, z)$ являются корнями матричного уравнения $A_k \cdot f_k = 0$, где $A_k = (A - \lambda_k \cdot E) \cdot f_k = 0$. Для уникальных λ_k , если минор $Mk_{00} = ak_{11} \cdot ak_{22} - ak_{12}^2 \neq 0$, то x - свободная переменная и

$$y = \frac{ak_{10} \cdot ak_{22} - ak_{20} \cdot ak_{12}}{ak_{12}^2 - ak_{11} \cdot ak_{22}} \cdot x, \quad z = \frac{ak_{20} \cdot ak_{11} - ak_{10} \cdot ak_{21}}{ak_{12}^2 - ak_{11} \cdot ak_{22}} \cdot x.$$

Аналогично вычисляется f_k , при других ненулевых. Для кратных λ_k

$$f_0(0) = f_2(0), f_0(1) = f_2(1), f_0(2) = |f_2| \cdot (1 / \cos \theta - \cos \theta), f_1 = [f_2 x f_0].$$

Матрица линейного преобразования M состоит из нормированных собственных векторов. $f_k / |f_k|$. Перейдем в канонический базис:

$$X^T \cdot A \cdot X + 2 \cdot B \cdot X + C = (M \cdot X_k)^T \cdot A \cdot (M \cdot X_k) + 2 \cdot B \cdot (M \cdot X_k) + C = \\ X_k^T \cdot (M^T \cdot A \cdot M) \cdot X_k = X_k^T \cdot A_k \cdot X_k + 2 \cdot B_k \cdot X_k + C.$$

Выделение из канонической квадратичной формы полного квадрата дает параметры поверхности и точку начала отсчета.

Вид отсчетной поверхности зависит от точности вычисления A_k, B_k, C . Так цилиндр можно представить, как вытянутый эллипсоид, что интерпретируется как аналитическая модель отклонения формы.

Предложен аналитический алгоритм вычисления отклонения формы канонических поверхностей приближенным градиентным методом. Градиент (F_x', F_y', F_z') вычисляется в точке $M_i(x_i, y_i, z_i)$, от которой следует определить расстояние до поверхности. Показано, что погрешность, вызванная тем, что градиент проведен не в точке поверхности, пренебрежимо мала в силу малости отклонений. Тогда

$$F_x' = 2 \cdot (a_{00} \cdot x_i + a_{01} \cdot y_i + a_{02} \cdot z_i + b_0),$$

$$F_y' = 2 \cdot (a_{10} \cdot x_i + a_{11} \cdot y_i + a_{12} \cdot z_i + b_1),$$

$$F_z' = 2 \cdot (a_{20} \cdot x_i + a_{21} \cdot y_i + a_{22} \cdot z_i + b_2).$$

Градиент и точка M_i задают прямую, коллинеарную нормали:

$$(x - x_i) / F_x' = (y - y_i) / F_y' = (z - z_i) / F_z'.$$

Выразив переменные y и z через x , и подставив в уравнение поверхности, получим точку пересечения градиента с поверхностью. Отклонение формы есть расстояние от нее до точки M_i .

В главе 4 рассмотрена реализация задач анализа и контроля точности выходных геометрических параметров ОП в виде пакетов прикладных программ на основе предлагаемой геометрической модели и концепции статуса. На их базе проведен вычислительный эксперимент по моделированию распределений выходных геометрических параметров, выполнена оценка положения на полученных распределениях значений выходных параметров при наихудших сочетаниях входных.

Моделируются параметры геометрии масс: объем, координаты центра масс и моменты инерции. Этапы моделирования:

- построение номинальной геометрической модели;
- проверка значений выходных параметров при номинальных значениях входных (управляемых) параметров;
- задание допусков на отклонение входных параметров;
- выполнение необходимого количества итераций моделирования;
- статистическую обработку и анализ результатов эксперимента.

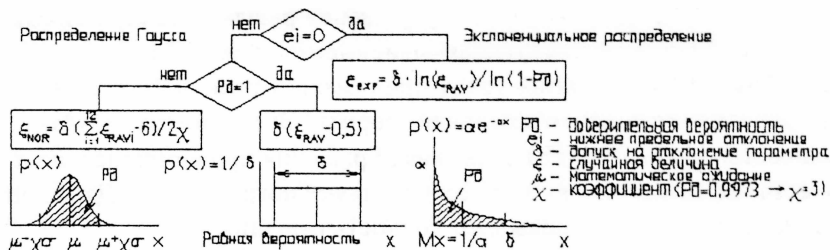
Модель одной реализации есть совокупность графических элементов представляющих поверхности объекта моделирования, и правило образования из них единого тела логическими операциями.

Каждая реализация моделирования состоит из следующих шагов:

- вычисление случайных значений координат собственных СК графических элементов, представляющих поверхности модели;
- создание из выбранных элементов единого тела объекта моделирования по заданному алгоритму с сохранением копий элементов;
- определение выходных параметров моделируемого тела;
- запись текущих значений выходных параметров объекта моделирования и (при необходимости для последующей статистической обработки) управляемых параметров в файл статистики;
- удаление моделируемого тела (откат в исходное состояние).

Состояние модели в каждой реализации определяется случайными значениями $e\xi_i$ геометрических параметров ее элементов. Величина $e\xi_i$

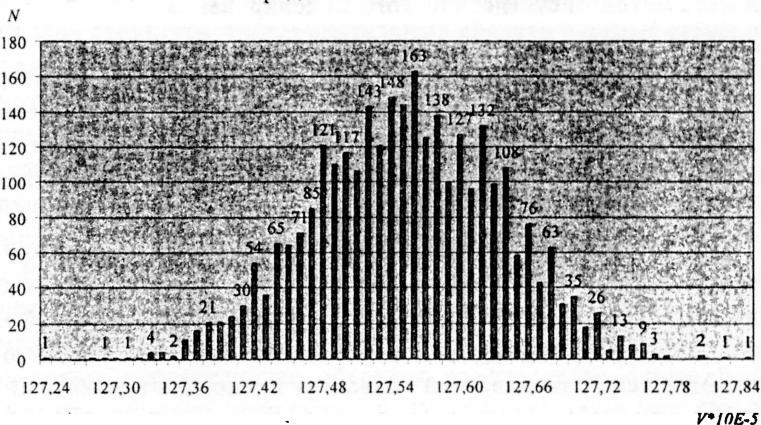
есть сумма номинального значения N_i и случайного отклонения ξ_i в пределах допуска δ : $e\xi_i = N_i + \xi_i$. Систематические погрешности не рассматриваются. По теоремам Шеннона принято, что распределение ξ_i подчиняется одному из трех модельных законов: равновероятностному, экспоненциальному или нормальному:



Выбор модельного распределения по теоремам Шеннона

Принято количество реализаций $n = 3011$, что соответствует $P_\delta = \gamma = 0,9973$ для двусторонних непараметрических интервалов. По накопленной статистике построены гистограммы распределения (Приложение 2). Пример распределения объема показан на следующем рисунке:

Распределение значений объема



Для проверки алгоритма определения геометрических параметров ОП, ограниченного аналитическими поверхностями первого и второго порядка, по множеству его точек проведен математический эксперимент по исследованию зависимости точности решения от

- количества точек n взятых на поверхности,

- числа верных десятичных разрядов в их представлении d ,
- характера их взаимного расположения.

Для этого вычислены случайные координаты точек поверхностей, по ним восстановлены параметры поверхностей. Как показывает эксперимент, точность решения зависит от n , при большой погрешности координат ($d < 8$), однако скорость улучшения решения быстро снижается с ростом n . Поэтому следующая зависимость проверялась для $n = 100$. Величина d в координатах точек принималась равной 1, 2, 3, 4, 8, что интерпретируется как отклонение формы. Эксперимент показал, что количество верных десятичных знаков решения пропорционально $d \leq 8$, то есть алгоритм не вносит собственную погрешность. Дальнейший рост d практически не повышает точность решения.

Исследование зависимости точности от расположения точек показывает, что для получения приемлемого решения при малом n следует брать точки, распределенные по всей исследуемой поверхности.

В заключении изложены научные и практические результаты.

В приложении дано соответствие допусков формы и расположения поверхностей управляемым параметрам предложенной геометрической модели ОП. Приведены результаты анализа точности компонентов геометрии масс методом статистического моделирования.

Основные выводы.

1. Предложено пространство управляемых параметров геометрической модели объекта производства, позволяющее задавать размеры, расположение и форму поверхностей модели, что обеспечивает адекватное отображение его реальной геометрии в процессе автоматизированного проектирования.

2. Проведен анализ методов расчета допусков на отклонение геометрических параметров объекта производства, показавший, что использование в качестве управляемых параметров математической модели одной реализации в методе статистических испытаний атрибутов ограничивающих его поверхностей позволяет проводить адекватный анализ точности и рассчитывать допуски его геометрических параметров в произвольно заданном базисе с использованием аффинных преобразований их случайных значений.

3. Предложено включать в описание поверхностей геометрической модели объекта производства предельные значения и законы распределения отклонений их геометрических параметров, что позволяет генерировать случайные реализации геометрической модели. В сочетании с

методом статистического моделирования геометрических параметров модели в пределах заданных допусков эти параметры являются необходимым условием разработки объектно-ориентированной вероятностной геометрической модели объекта производства.

4. Определен критерий выбора вида аппроксимирующей поверхности в зависимости от способа описания поверхности в конструкторской документации на основе проведенного сравнительного анализа аппроксимации реальных поверхностей средними и номинальными в отличие от традиционной методики контроля точности по прилегающим поверхностям. Предложен аналитический алгоритм определения параметров средних отсчетных поверхностей, который целесообразно применять при контроле точности канонических поверхностей первого и второго порядка по координатам точек, полученных при измерении на координатно-измерительных машинах.

5. Предложена аналитическая модель отклонения формы канонических поверхностей первого и второго порядка, которую предлагается использовать в процессе проектирования для моделирования искажений геометрии объекта производства, что обеспечивает численное выражение величины отклонения в любой точке поверхности.

6. На основе предложенной методики и математической модели обоснована структура инструментальных средств и разработаны пакеты прикладных программ для анализа точности выходных геометрических параметров объекта производства методом статистических испытаний, а также контроля точности выходных геометрических параметров путем сравнения параметров поверхностей аппроксимирующих реальные поверхности объекта производства с параметрами номинальных поверхностей, заданных в конструкторской документации.

7. Разработан пакет прикладных программ анализа точности, который целесообразно использовать для проведения математического эксперимента по моделированию распределений значений массинерционных характеристик объектов производства сложной формы методом статистических испытаний. Этот пакет позволяет определять критичные значения выходных геометрических параметров проектируемой конструкции на этапе технического проекта, не прибегая к дорогостоящим натурным испытаниям.

8. Для контроля точности изделий высокоответственного назначения рекомендуется использовать разработанный пакет прикладных программ, выполняющий восстановление параметров пространственно-

го положения аппроксимирующих канонических отсчетных поверхностей по заданным координатам точек реальных поверхностей объекта производства. Проведенный математический эксперимент показал, что реализованный в данном программном пакете алгоритм обеспечивает точность решения прямо пропорциональную количеству верных десятичных разрядов в координатах измеренных точек.

9. Разработанные в диссертационной работе математическая модель, инженерная методика и инструментальные средства в виде методик, алгоритмов и пакетов прикладных программ реализованы в САПР MicroStation95 компании Bentley Systems Inc. и ADEM версии 6.2 компании "Омега Технолоджиз Лтд.", что позволило использовать эту систему для моделирования допусков на отклонения параметров геометрической модели и вычисления их реальных значений по результатам измерения.

Содержание диссертации отражено в следующих печатных работах:

Кашуба Л.А., Погребинский А.В. Разработка программного комплекса для определения статуса поверхностей элементов конструкции в среде MicroStation // Компьютерная хроника. - 1997. - № 10. С. 27-53.

Кашуба Л.А., Погребинский А.В. Формирование статуса поверхностей в среде MicroStation // Компьютерная хроника. - 1997. - № 10. - С. 53-67.

Кашуба Л.А., Погребинский А.В. Определение статуса поверхностей при переходе к другому базису // Компьютерная хроника. - 1997. - № 10. - С. 69-83.

Кашуба Л.А., Погребинский А.В., Ермаков Е.А. Определение параметров положения отсчетных поверхностей среди точек реальных поверхностей // Компьютерная хроника. - 1998. - № 6. - С. 34-58.

Кашуба Л.А., Кокоушкин Г.А., Погребинский А.В. Задание геометрии объектов производства и интерпретация результатов измерения на координатно-измерительных машинах в САПР // Состояние и проблемы измерений, Тез. докл. 6-й всероссийской научно-технической конф. - М., 1999. - Ч.1. - С. 87-88.

Жук Д.М., Погребинский А.В. Математическое обеспечение автоматизированного проектирования изделий сложной формы с учетом реальной геометрии. // 170 лет МГТУ им. Н.Э.Баумана, Тез. докл. всероссийской научно-технической конф. - М., 2000. - Ч.1. - С. 131.

Погребинский А., Павлов А. Сравнительный анализ CAD/CAM-систем // САПР и графика. - 2000. - №8. - С. 75-77.