

## **Часть 1. МЕТРОЛОГИЯ**

### **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ НОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ**

**В.Л.Соломахо**, доктор технических наук, профессор кафедры СМИС;  
**С.С.Соколовский**, кандидат технических наук, доцент кафедры СМИС;  
**Б.В.Цитович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры СМИС;  
**Ю.Б.Спесивцева**, инженер кафедры СМИС;  
**О.А.Ленкевич**, преподаватель кафедры СМИС;  
**К.И.Дадыков**, преподаватель кафедры СМИС

Одним из эффективных механизмов повышения качества изделий машино- и приборостроения является рационализация процессов проектирования, изготовления и контроля изделий. В качестве одного из вариантов реализации этого механизма предлагается использовать оптимизацию нормирования и контроля геометрических параметров деталей по критерию обеспечения требуемых эксплуатационных показателей (характеристик) изделий при их минимальной технологической себестоимости. При этом можно выделить три возможных направления или пути достижения поставленной цели (рис.1). Рассмотрим эти пути более подробно.

#### **I. Оптимизация норм точности функциональных параметров изделий.**

При проектировании любого изделия приходится решать сложную комплексную задачу обеспечения требуемых эксплуатационных показателей при минимальной себестоимости изделия. Одним из эффективных путей ее решения является рационализация норм точности функциональных параметров изделий, определяющих их эксплуатационные показатели. В качестве варианта такой рационализации предлагается оп-

тимизация размерных цепей в процессе проектирования изделий [1 – 3]. Целью такой оптимизации является обеспечение требуемой точности исходных звеньев размерных цепей изделия при минимальной технологической себестоимости.

Задача определения норм точности составляющих звеньев размерных цепей требует разработки критериев, которые обеспечат точностные показатели исходных звеньев при минимальной технологической себестоимости получения всех звеньев цепи. Это может быть достигнуто рациональным повышением точности менее «затратных» звеньев и снижением точности более «затратных». В общем случае необходимо оптимизировать систему взаимосвязанных размерных цепей, причем задача усложняется, если некоторые составляющие звенья входят одновременно в несколько различных цепей.

Применяемые на практике методы определения точности составляющих звеньев при заданной точности исходных звеньев основаны на допущении, что равноточные звенья характеризуются примерно одинаковой технологической себестоимостью их реализации [4].



Рис. 1. Пути повышения качества изделий

Однако известно, что технологическая себестоимость отдельных звеньев размерных цепей зависит не только от их точности, но и от формы, размеров, физико-механических свойств материалов соответствующих элементов изделия и т.д. Поэтому использование традиционных методов проектирования норм точности составляющих звеньев размерных цепей не может (в общем случае) обеспечить оптимизацию системы размерных цепей по стоимостному критерию. Такая оптимизация частично реализуется только при использовании метода пробных расчетов (метода проб и ошибок). При этом зависимость стоимости от точности учитывается чисто интуитивно на основании опыта разработки и изготовления предшествующих конструкций изделий по принципу «так грубо, как только возможно».

Анализ литературных источников позволил выявить ряд методов оптимизации норм точности составляющих звеньев размерных цепей по стоимостному критерию [5]. Общим недостатком этих методов является отсутствие четкого, практически реализуемого механизма количественной оценки технологической себестоимости реализации различных составляющих звеньев размерных цепей в зависимости от их точности. Отправной точкой этих методов является посылка, что зависимость стоимости изготовления каждого составляющего звена от его точности уже известна и описывается аналитическими выражениями того или иного вида.

Вместе с тем способы определения постоянных параметров, входящих в эти зависимости, либо не приводятся вообще, либо их практическая реализуемость вызывает большие сомнения. Отсутствует методическое и информационное обеспечение способов их определения,

поскольку эти параметры существенно зависят от множества разнородных конструктивно-технологических факторов. Отмеченные недостатки явились одной из основных причин того, что на практике при проектировании изделий эти методы фактически не применяются.

Таким образом, при разработке практически любых подходов к оптимизации норм точности составляющих звеньев размерных цепей по стоимостному критерию с использованием количественных методов необходимо прежде всего создать эффективный механизм количественной оценки технологической себестоимости составляющих звеньев размерных цепей в зависимости от назначаемых норм точности. Основу функционирования такого механизма должны составлять как собственно методики оценки технологической себестоимости звеньев, так и информационное обеспечение этих методик. Такие методики и их информационное обеспечение должны быть ориентированы на решение поставленной задачи на этапе проектирования изделия, когда вопросы разработки технологических процессов его изготовления еще не решены. Очевидно, что в данном случае широко используемые на практике методы поэлементной оценки себестоимости технологических процессов непосредственно не могут быть использованы.

Состав, структурная организация, принципы построения, а также форма представления информационной базы во многом определяются особенностями методического обеспечения расчетов. Поэтому создание механизма количественной оценки технологической себестоимости звеньев целесообразно начинать с разработки ее методического обеспечения.

В настоящее время существуют различные методики количественной оценки технологической себестоимости изготовления деталей, которые могут быть использованы при наличии детальной информации о технологических процессах (применяемом технологическом оборудовании и оснастке, квалификации персонала, режимах резания и др.). Многовариантность технологий получения отдельных элементов деталей делает практически невозможным использование таких методик на этапе проектирования изделий.

Наиболее существенные типовые недостатки известных методик:

- методики, как правило, позволяют оценить себестоимость изготовления деталей (или их законченных конструктивно-технологических элементов) в целом, а не элементов размерных цепей;

- для выполнения расчетов на базе этих методик необходимо подробное знание элементов технологических процессов, что неизвестно на этапе проектирования изделия;

- влияние интересующих разработчика точностных характеристик звеньев размерных цепей на себестоимость их получения «замаскировано» и проявляется лишь через влияние этих характеристик на технологический процесс (в частности, на характеристики его отдельных составляющих);

- методики базируются на абсолютных стоимостных показателях (стоимости станков, технологической оснастки, режущего инструмента и т.д.), которые изменяются с течением времени.

В справочной литературе приводятся абсолютные значения стоимостных показателей, относящиеся к различным периодам времени. Очевидно, что в таком виде их нельзя использовать для оценки и сопоставления стоимости ре-

ализации отдельных составляющих звеньев размерных цепей. Анализ показывает, что для оптимизации размерных цепей в большинстве реальных ситуаций предпочтительно использовать согласованные относительные показатели.

Для достижения поставленной цели предлагается использовать обобщенный подход к оценке технологической себестоимости получения составляющих звеньев размерных цепей. В его основе лежит решение следующих задач:

- 1) типизация и классификация звеньев размерных цепей по конструктивно-технологическим признакам с выделением в каждой классификационной группе «базового» варианта (характеризуемого конкретными точностью, номинальным размером звена, геометрическими параметрами определяющими его элементы и их материалами, серийностью производства и т.п.);

- 2) разработка методик оценки относительной технологической себестоимости получения базовых звеньев каждой классификационной группы;

- 3) разработка методик оценки относительной технологической себестоимости получения звеньев каждой классификационной группы с учетом отличия их характеристик от характеристик базовых звеньев.

Решение каждой из этих задач требует разработки соответствующего аппарата. Значительную сложность представляет последняя из них. Для ее решения могут быть использованы, в частности, методы статистической обработки данных по технологической себестоимости изготовления деталей и их элементов, полученных:

- а) от предприятия (предприятий);

- б) методами экспертных оценок;

- в) с использованием специально разрабатываемой системы имитационного

моделирования технологической себестоимости (СИМТС) получения различных звеньев размерных цепей.

Каждый из этих подходов к получению указанных данных имеет свои преимущества и недостатки, поэтому наиболее перспективно их комплексное применение.

Реализация последнего из этих способов представляет, с нашей точки зрения, наибольший научный интерес. В качестве основных компонентов СИМТС можно выделить следующие:

- «генератор деталей», содержащих элементы звеньев размерных цепей;
- модуль оценки технологической себестоимости получения элементов звеньев;
- модуль сбора и систематизации данных о технологической себестоимости получения различных звеньев размерных цепей;
- модуль статистической обработки получаемых данных.

Основная функция генератора – моделирование деталей с элементами звеньев размерных цепей в соответствии с разработанным классификатором этих звеньев. Он должен обеспечить требуемую вариативность элементов по указанным ранее характеристикам.

В качестве второй из отмеченных компонент можно использовать элементы существующих, достаточно развитых САПР технологических процессов обработки деталей в машиностроении, включающие функции технического нормирования и определения технологической себестоимости получения элементов деталей. При отсутствии подходящей САПР может быть разработан специализированный модуль укрупненной оценки технологической себестоимости получения элементов звеньев размерных цепей,

ориентированный на решение поставленной задачи.

Основная функция третьей компоненты заключается в первичной обработке получаемой информации, группировании элементов по их характеристикам, формировании данных по технологической себестоимости получения звеньев и систематизации этих данных.

Модуль статистической обработки должен обеспечить определение интегральных зависимостей технологической себестоимости получения звеньев из каждой классификационной группы от их характеристик.

В основу построения таких зависимостей предлагается положить следующие принципы:

- технологическая себестоимость получения звена каждой классификационной группы рассматривается как функция технологической себестоимости получения базового варианта группы с учетом отличий характеристик конкретного звена от базового;
- себестоимость получения базового звена рассматривается как взвешенная сумма себестоимостей элементов этого звена, где весовые коэффициенты учитывают степень и характер вхождения элементов в различные звенья;
- используются относительные стоимостные показатели и коэффициенты относительной стоимости для перехода от базового варианта звена к любому конкретному;
- учитываются изменения абсолютных стоимостных показателей с течением времени.

Предлагаемые механизмы позволяют использовать оптимизацию нормирования геометрических параметров деталей по критерию обеспечения требуемых эксплуатационных показателей (харак-

теристик) изделий при их минимальной технологической себестоимости.

## **II. Оптимизация взаимосвязанных полей допусков и систем координат контролируемых элементов деталей.**

При использовании традиционного подхода к контролю геометрических параметров деталей каждый контролируемый параметр измеряется автономно в своей системе координат (плавающей или фиксированной) и ограничивается своим полем допуска, не связанным с полями допусков других геометрических параметров. Все это приводит к появлению в результатах измерений методических погрешностей систематического характера из-за несовпадения систем координат и, как результат, к увеличению количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей. Таким образом, некоторые функционально годные детали будут ошибочно относиться к группе бракованных деталей и наоборот. Чтобы повысить качество измерения геометрических параметров деталей предлагается использовать нетрадиционный подход к координатным измерениям и контролю, суть которого заключается в следующем.

Контролируемую деталь необходимо рассматривать как комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных реальных геометрических элементов (поверхностей, профилей, точек и т.д.), отделяющих ее от окружающей среды. Исходя из этого все элементы контролируемой детали или все контролируемые их геометрические параметры должны измеряться в одной фиксированной (жестко связанной с контролируемой деталью) системе координат, что несложно реализовать при использовании многомерных специальных или многокоординатных универсальных измерительных приборов (двух- и трехкоординатных). При этом

годной следует считать деталь, все реальные элементы которой могут быть “вписаны” между двумя ее предельными контурами, соответствующими максимуму материала и минимуму материала детали. Положение таких контуров может быть определено и описано аналитически в соответствии с заданными на чертеже детали полями допусков всех рассматриваемых элементов, представляемыми как некоторый комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных полей допусков детали.

Для проверки такого условия годности предлагается осуществлять оптимизацию системы координат детали (поиск оптимального пространственного расположения реальных элементов детали) с одновременным аналитическим перераспределением взаимосвязанных полей допусков (оптимизацией области или пространства допусков детали). Если при этом окажется возможным так перераспределить поля ее допусков и “расположить” контролируемую деталь, чтобы все ее реальные элементы “вписались” между “плавающими” предельными контурами, то такая деталь может считаться функционально годной. При использовании традиционного подхода к контролю эта же деталь может быть забракована по отдельным геометрическим параметрам или элементам.

Предлагаемый новый подход к контролю геометрических параметров деталей на базе координатных измерений предполагает совместное использование аналитического и экспериментального моделирования объекта измерения с привлечением компьютерной техники. Общий алгоритм решения любой измерительной задачи такого типа можно представить в виде следующего ряда последовательных этапов и операций.

1. Аналитическое описание комплексного поля допусков объекта измерения (построение нормативной аналитической модели контролируемой детали).

2. Измерение геометрических параметров контролируемой детали и получение экспериментальной метрологической модели объекта измерения.

3. Трансформация экспериментальной метрологической модели объекта измерения в аналитическую модель реального объекта (конкретной контролируемой детали).

4. Первичное сопоставление аналитической модели контролируемой детали с ее нормативной аналитической моделью (аналитическое “наложение” или “совмещение” моделей) с целью определения годности детали и при необходимости дальнейшей оптимизации ее системы координат.

5. Оптимизация системы координат контролируемой детали (аналитическое переориентирование или преобразование системы координат), осуществляемая совместно с одновременным перераспределением полей допусков ее геометрических параметров. Оптимизация расположения предельных контуров детали осуществляется с целью обеспечения наилучших (оптимальных) условий “совмещения” аналитической модели реальной детали и ее нормативной аналитической модели. Таким образом, кроме оптимизации системы координат контролируемой детали этот этап предполагает также некоторую допустимую корректировку ее первичной нормативной аналитической модели, суть которой состоит в оптимизации нормативной аналитической модели при условии обеспечения ее функциональной адекватности первичной нормативной аналитической модели.

6. Оценка результатов оптимизации системы координат контролируемой детали и ее нормативной аналитической модели (вторичное сопоставление аналитической модели детали и ее нормативной аналитической модели) и заключение о годности детали.

### **III. Оптимизация методик выполнения измерений функциональных геометрических параметров деталей.**

подавляющее большинство измерительных задач в машиностроении и приборостроении связано с контролем геометрических параметров деталей (размеров, отклонений формы, расположения поверхностей и др.). Все измерения геометрических параметров по сути являются координатными и их можно разделить на однокоординатные и многокоординатные (двух- и трехкоординатные). Как однокоординатные, так и многокоординатные измерения могут осуществляться либо в плавающей, либо в фиксированной системе координат.

Анализ современного состояния координатных измерений показал, что при большом разнообразии методик таких измерений нет единых принципов, а также общей методологии проектирования методик и оценки методических погрешностей. Можно утверждать, что в настоящее время практически отсутствует целостная теория координатных измерений, и это является существенным сдерживающим фактором на пути дальнейшего развития данного вида измерений.

В основу общей методологии оптимизации координатных измерений геометрических параметров деталей предлагается положить впервые сформулированный, теоретически и экспериментально обоснованный принцип технологическо-метрологического соответствия или преемственности между операциями

контроля и механической обработки элементов деталей.

Результаты статистических исследований макрогеометрии реальных поверхностей деталей, полученных различными методами, позволяют утверждать, что конкретное технологическое оборудование, кинематика технологического процесса, условия базирования и закрепления заготовок, режущий инструмент и его геометрические параметры, а также ряд других повторяющихся от детали к детали факторов порождают статистически однородную совокупность получающихся профилей и поверхностей, имеющих индивидуальные случайные особенности.

В основе статистической устойчивости спектральных характеристик макрогеометрии реальных поверхностей лежит однотипность и достаточная стабильность технологических процессов их получения. Подтверждение стабильности технологических процессов с точки зрения формообразования изготавливаемых поверхностей – одна из основных предпосылок разработки оптимизированных методик координатных измерений. На основе априорной информации о технологических процессах появляется возможность использовать при координатном контроле геометрических параметров деталей адекватные аналитические модели их реальных поверхностей, воспроизводимых по результатам измерения координат минимально необходимого, но достаточного количества контролируемых точек.

Наибольшего эффекта от такой минимизации количества контролируемых точек реальных элементов деталей можно достичь в случае оптимизации методик выполнения измерения и проектирования специальных многомерных (многощуповых) средств измерений.

Отличительной особенностью таких средств измерений является возможность получать измерительную информацию с необходимого числа контрольных точек трехмерных поверхностей деталей при относительно небольших перемещениях многощуповой измерительной головки по одной координате. Конструкция таких приборов исключает погрешности, связанные с большими перемещениями измерительной головки и неперпендикулярностью осей координат отсчетных устройств.

Специальные многомерные СИ строятся на модульных принципах. Они komponуются из унифицированных, конструктивно и функционально законченных блоков модулей: многощуповых блоков, модулей управляющих устройств, измерительных и вспомогательных перемещений, загрузочных устройств и др.

Экономичность производства и эксплуатации этих СИ достигается за счет применения многощуповых блоков, к точности которых не предъявляется особых требований. Их самоаттестация выполняется непосредственно на приборе с использованием образцовых деталей максимальной простой конфигурации.

Разработанные принципы проектирования многомерных СИ и методик математической обработки поступающей с отсчетных устройств информации позволяют аналитически компенсировать погрешности, вызванные неточностью механических элементов конструкции.

## Литература

1. Фриндендер И.Г. Расчеты точности машин при проектировании. – Киев; Донецк: Вища школа, 1980. – 182 с.
2. BJORKE O. Computer-Aided Tolerance. – 2 nd ed. – New York: ASME Press, 1991.
3. ZEID I. Mechanical Tolerancing in CAD/CAM Theory and Practice. – New York: McGraw-Hill, 1991.
4. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Расчет допусков размеров. – М.: Машиностроение, 1981. – 189 с.
5. Бочкарев В.Н. Решение задач по экономической оптимизации допусков// Стандарты и качество. – 1980. – № 6. – С. 55-57.