

ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МЕТОДИК
КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Минск
БНТУ
2012

УДК006.91+531.7

Авторы:

В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович, С.С. Соколовский, Д.В. Соломахо

Печатается по решению научно-технического совета
Белорусского национального технического университета
(протокол № 11 от 22 декабря 2011 г.)

Теория, расчет и проектирование оптимизированных методик координатного контроля в машиностроении / В.Л. Соломахо [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012. – 239 с.

ISBN 978-985-525-863-7.

В монографии рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с комплексным подходом к проблеме повышения качества координатного контроля геометрических параметров деталей машиностроения. Подробно изложены принципы адаптивного нормирования допустимой погрешности измерений в зависимости от уровня стабильности технологического процесса и достоверности результатов измерений. Рассмотрены принципы проектирования оптимизированных методик координатных измерений, а также структурные схемы специальных многощуповых средств измерений, предназначенные для их реализации.

Издание предназначено для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, специалистов, занимающихся проблемами метрологического обеспечения производства. Монография может быть полезна студентам, магистрантам и аспирантам приборостроительных специальностей.

Табл. 11. Ил. 77. Библиогр.: 76 поз.

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Г.М. Левин;

д-р техн. наук, проф. О.П. Реут

ISBN 978-985-525-863-7

© БНТУ, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	8
1.1 Методологические основы координатных измерений.....	8
1.2 Структура метрологического обеспечения координатного контроля деталей машиностроения.....	19
1.3 Метрологические модели объектов измерительного контроля.....	23
2 РАСЧЕТ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КООРДИНАТНОМ КОНТРОЛЕ ПО КРИТЕРИЮ ДОПУСТИМОГО РИСКА.....	44
2.1 Метрологические модели процессов операционного контроля.....	44
2.2 Метрологическая модель операционного контроля применительно к контролю продукции при нормальном распределении контролируемого параметра и погрешности измерения.....	55
2.3 Метрологическая модель операционного контроля применительно к контролю продукции при нормальном распределении контролируемого параметра и равномерном распределении погрешности измерения.....	68
2.4 Нормирование погрешности измерения при решении задач операционного контроля исходя из принятых метрологических моделей.....	75
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МВИ НА БАЗЕ ПРИНЦИПА ТЕХНОЛОГИЧЕСКО - МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО СООТВЕТСТВИЯ.....	80
3.1 Принцип технологическо-метрологического соответствия и условия, необходимые для его реализации.....	80

3.2	Обоснование возможности использования принципа технологическо-метрологического соответствия при проектировании методик выполнения координатных измерений геометрических параметров номинально плоских поверхностей деталей.....	85
3.2.1	Метод координатных измерений отклонений от плоскостности с использованием аналитического моделирования реальных поверхностей по четырем контрольным точкам (метод «четырёх точек»).....	97
3.2.2	Метод координатных измерений отклонений от плоскостности с использованием аналитического моделирования реальных поверхностей по семи контрольным точкам (метод «семи точек»).....	106
3.2.3	Метод координатных измерений отклонений от плоскостности с использованием аналитического моделирования реальных поверхностей по девяти контрольным точкам (метод «девяти точек»).....	111
3.2.4	Анализ источников методических погрешностей измерений.....	114
3.3	Методика измерений номинально криволинейных поверхностей, представленных ограниченными участками....	122
3.4	Критерии адекватности метрологических моделей объектов контроля.....	134
4	НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПОЛЕЙ ДОПУСКОВ.....	137
4.1	Сравнительный анализ вариантов интерпретации предельных размеров в ходе координатного контроля.....	137
4.2	Математическое обоснование возможности оптимизации координатного контроля геометрических параметров «плоских» деталей.....	154

4.3	Методика координатного контроля геометрических параметров номинально плоских поверхностей деталей с оптимизированной интерпретацией предельных размеров...	160
5	СПЕЦИАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ	168
5.1	Классификация средств координатных измерений.....	168
5.2	Принципы построения и структурные схемы специальных средств операционного контроля геометрических параметров деталей.....	174
5.3	Метрологическое моделирование специальных средств для операционного контроля геометрических параметров деталей.....	192
5.4	Классификация и конструктивные исполнения щупов СМСИ.....	196
5.5	Конструкции и принципы действия чувствительных модулей (щупов) специальных многомерных многощуповых средств измерений.....	197
5.6	Моделирование и методика поверки специальных многощуповых средств измерений.....	216
5.7	Структурные схемы специальных многощуповых средств измерений (СМСИ), предназначенные для решения типовых метрологических задач.....	225
	ЛИТЕРАТУРА	230

ВВЕДЕНИЕ

Развитие рыночных отношений стимулирует постоянное повышение требований к качеству промышленной продукции, что является важнейшим фактором обеспечения ее конкурентоспособности на международном рынке.

В 80-е годы прошлого столетия, характеризующиеся высокими темпами научно-технического прогресса, появлением принципиально новых видов изделий и резким усложнением их конструкций, созданием и широким освоением сложных технических систем и наукоемких технологий, создались объективные причины, потребовавшие особого внимания к проблеме качества продукции.

Качество продукции формируется, обеспечивается, анализируется и поддерживается на всех стадиях ее жизненного цикла. Точность деталей машин и приборов непосредственно влияет на их эксплуатационные характеристики, что в значительной мере определяет уровень качества выпускаемых изделий. Повышение качества продукции машиностроения и приборостроения невозможно без улучшения качества контроля, его достоверности.

Контроль не только способствует предотвращению выпуска продукции неудовлетворительного уровня качества, но и является одним из основных источников снижения затрат на качество. Еще большее значение имеет возможность использования результатов контроля для оценки состояния производственного процесса с целью оперативного применения тех или иных управляющих решений. С учетом этого обстоятельства можно заключить, что контроль косвенно способствует «улучшению» качества продукции и является важным структурным элементом системы менеджмента качества.

Вопросам контроля, методам и средствам измерения, а также метрологическому обеспечению измерений в машиностроении и приборостроении посвящено большое количество работ отече-

ственных и зарубежных авторов [1–8]. Вместе с тем, до сих пор не достаточно исследованы некоторые фундаментальные проблемы метрологического обеспечения координатных измерений в машиностроении. К таким проблемам относится в первую очередь поиск научно-обоснованных путей повышения достоверности результатов координатного контроля, а также оптимизация методик выполнения измерений по критерию снижения их трудоемкости и себестоимости и разработка специализированных средств измерений, реализующих разработанные оптимизированные методики.

ГЛАВА 1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1 Методологические основы координатных измерений

Измерения в самом широком смысле термина являются измерениями уровня качества объекта по выбранному свойству.

Поскольку качество объекта представляет собой совокупность всех его свойств, оценивание качества объекта всегда включает количественные оценки некоторого выбранного числа свойств и начинается с оценивания его отдельных свойств, принимаемых за простые. При этом под простыми свойствами понимаются не те, которые нельзя разложить на еще более простые, а те, декомпозиция которых нерациональна. Под оценкой свойства объекта подразумевается местоположение данного свойства на определенной оценочной шкале.

Принято различать следующие виды шкал [9]:

- шкала наименований (номинационная или номинальная шкала);
- шкала порядка (ординальная или ранговая шкала);
- шкала интервалов (интервальная шкала);
- шкала отношений.

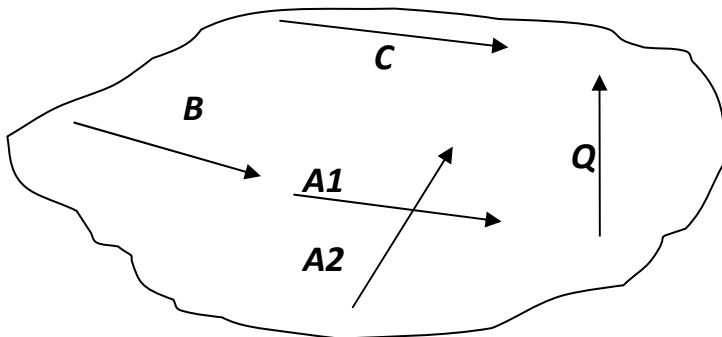
Иногда к этим шкалам добавляют еще «абсолютную» шкалу.

Все перечисленные виды шкал (кроме шкалы наименований) предназначены для сопоставления уровней интенсивности однотипного свойства, характеризующего один объект или некоторое множество объектов. Это соответствует исходному смыслу слова шкала (по латыни *skala* – лестница), определяемому как последовательность чисел или величин, расположенных в восходящем или нисходящем порядке.

Базовой для построения всех шкал является «шкала наименований», поскольку без идентификации свойства нельзя построить шкалу его интенсивности. Но идентификация свойства без определения других отношений на множестве однородных объ-

ектов не гарантирует возможности построения более мощных в информативном смысле шкал.

Шкала наименований представляет собой не одну шкалу, объединяющую множество однотипных объектов, а скорее множество разнотипных шкал совершенно независимых или пересекающихся (рис. 1.1). В метрологии используют шкалы наименований погрешностей: погрешности систематические и случайные, погрешности инструментальные, методические, субъективные, погрешности из-за отличия условий измерения от нормальных. Эти шкалы пересекаются между собой (например, инструментальная и систематическая погрешность), поскольку обе они являются шкалами наименований погрешностей. Однако эти шкалы можно считать независимыми по отношению к шкалам наименований средств измерений или методов измерений.



Для условных наименований взяты литеры и цифры:
A1 – систематические погрешности, *A2* – случайные погрешности,
B – инструментальные погрешности, *C* – методы измерений,
Q – наименования физических величин,

Рисунок 1.1 – Шкалы наименований

Любая шкала наименований может рассматриваться как классификация однотипных объектов по некоторому основанию (классификационному признаку). Например, если отнести к однотипным объектам свойства, определяемые как физические

величины, можно представить шкалу наименований в виде размерностей физических величин.

Используемые в метрологии шкалы наименований включают наименования средств, видов и методов измерений, погрешностей измерений и их составляющих и др. Среди видов измерений значительный интерес представляют наиболее широко распространенные линейно-угловые измерения, подвидом которых можно считать координатные измерения. Очевидно, что для анализа координатных измерений следует четко определить само понятие, поскольку без такого определения невозможно получить объективные результаты классификации и оценки методов таких измерений.

В отличие от шкалы наименований, шкала порядка устанавливает фиксированный порядок расположения объектов в соответствии с уровнем интенсивности рассматриваемого свойства. Шкалы порядка используют при измерениях уровня значимости объектов, например при установлении приоритетов планируемых работ, при выборе вариантов методик выполнения измерений, средств измерений и т.д.

Можно отметить две существенные особенности присущие шкалам порядка:

- не закономерные (сложившиеся случайным образом) интервалы между соседними ступенями шкалы;
- инвариантность объектов к используемым оценочным единицам и к добавлению константы.

Шкала порядка позволяет не только сравнивать объекты, но и делать выводы об их упорядоченном расположении.

Можно привести такие примеры использования шкал порядка в метрологии: ранжированные классы точности приборов (0, 1 и 2), разряды эталонных средств измерений (1, 2, 3 и т.д.), упорядоченные по возрастанию или по убыванию ряды результатов измерений или отклонений от базового значения и т.д.

Шкалу интервалов иногда называют шкалой равных или равномерных интервалов, однако правильнее говорить о шкале закономерных интервалов (они могут быть построены не только равномерно, но и прогрессивно, экспоненциально, логарифмически). Принципиальное отличие от предыдущей шкалы в том, что положение выбранной точки на любой ступени шкалы ин-

тервалов жестко определено относительно других точек и соотношения координат точек шкалы поддаются расчету в соответствии с закономерностью построения шкалы. Недостатком такой шкалы является неопределенность ее начала, которое устанавливают условно.

Шкала отношений строится аналогично шкале интервалов, но имеет фиксированный ноль. Такая шкала полностью соответствует математической шкале чисел по определенности ступеней и возможностям оперирования элементами шкалы. Шкалы большинства физических величин являются шкалами отношений.

Шкалы широко используются в метрологии, так и в калитрии. Любое измерение свойства, осуществляемое аппаратурными или экспертными методами, опирается на использование той или иной шкалы.

Все измерения с использованием шкал порядка, интервалов и отношений можно рассматривать как координатные, поскольку измеряемая величина характеризуется на шкале двумя координатами, включая или не включая нулевую (можно использовать интервал от ненулевой точки). Достаточно высокий уровень строгости достигается при измерениях физических величин по шкалам интервалов и отношений. Не обладают высокой строгостью измерения на шкалах порядка, поскольку из-за отсутствия единицы однозначное определение координат на этих шкалах невозможно. При теоретическом рассмотрении координатных измерений из них следует исключать измерения на шкалах порядка (называемых условными шкалами), даже если эти шкалы окультурены и воспроизводятся аппаратурно с помощью средств измерений.

Основное уравнение измерения физической величины можно записать в виде

$$Q = Nq, \quad (1.1)$$

где Q – измеряемая физическая величина;

q – единица физической величины;

N – числовое значение физической величины (определяет соотношение измеряемой величины и использованной при измерениях единицы).

Из уравнения измерения следует, что в основе любого измерения лежит сравнение исследуемой физической величины с аналогичной величиной определенного размера, принятой за единицу. Суть измерения состоит в определении числового значения физической величины, причём достаточная теоретическая строгость может быть достигнута только при наличии фиксированной единицы. Шкала порядка не обеспечивает корректного соотношения измеряемой физической величины и принятой единицы и не отвечает основному уравнению измерения физической величины. При этом измерение может быть настолько объективным, насколько единообразно средствами измерений воспроизводится шкала физической величины, что подтверждает ценность шкалы порядка для метрологии.

На шкале отношений достаточно определить характеризующую измеряемую величину координату точки A , в результате чего становится известным расстояние OA . Примерами измерений на шкалах отношений являются измерения массы, объема, сопротивления прохождению электрического тока, освещенности.

При работе на шкале интервалов аналогичный вариант измерения реализуют после фиксации нуля. Возможны варианты с фиксацией нуля на шкале до измерений или без предварительной фиксации нуля. При реализации последнего варианта практически одновременно или последовательно фиксируют две координаты, значение одной из которых принимают за нулевую точку шкалы интервалов.

Все рассмотренные измерения, кроме измерения по шкале порядка, соответствуют основному уравнению измерений. Их можно рассматривать как координатные, поскольку суть такого измерения заключается в определении координаты точки A на закономерно построенной однокоординатной шкале с зафиксированным нулем. При измерении по шкале интервалов фиксация нуля может представлять собой отдельную операцию определения координаты точки O .

Измерения длин методологически сложнее, чем представляется на первый взгляд. Поскольку модуль длины соответствует аксиоматике числа и имеет фиксированный ноль, есть принци-

пиальная возможность измерений этой физической величины по шкале отношений. Однако длина может рассматриваться как величина векторная, следовательно, появляется возможность перехода через выбранный ноль и наличия (измерения) отрицательных величин, что не предусмотрено шкалой отношений. На четко очерченное понятие физической величины «длина» накладываются термины «расстояние» и «путь», причем расстояние может быть положительным и отрицательным, а пройденный путь (преодоленная длина) может как уменьшать, так и увеличивать расстояние до некоторой точки, условно принимаемой за нулевую отметку. Пройдя последовательно одинаковые отрезки пути в прямом и обратном направлениях (удвоенную длину по модулю), мы получаем расстояние от исходной точки, равное нулю. Аналогичные рассуждения могут быть проведены и по отношению к любым другим векторным величинам, например к углам или силам.

Картина линейных измерений существенно усложняется при выходе за пределы однокоординатной системы. Расстояние между любыми двумя точками в двух- или трехкоординатном пространстве геометрически связано с координатами по всем шкалам системы, но длину (расстояние между точками) идентифицируют тогда, когда система фактически сводится к однокоординатной (воспроизводится индивидуальная для данного расстояния шкала интервалов). Для оценки длины между другой парой точек воспроизводят новую шкалу. На любой детали можно построить множество разных идеальных систем координат от однокоординатных до трехкоординатных. Каждая из выбранных систем координат предназначена, прежде всего, для создания нормативной модели, в соответствии с которой деталь изготавливают и контролируют. Эти номинально заданные системы координат реализуют в процессе изготовления с помощью технологического оборудования, а затем при контроле с помощью средств измерений.

Все координатные системы идеальной модели объекта линейных измерений геометрически однозначно связаны между собой. В нормативной модели такие связи приобретают некото-

рую неопределенность, а реализации координатных систем при изготовлении и контроле часто представляют собой достаточно сложные задачи, решаемые с разными уровнями строгости. Практически всегда такие задачи возникают при измерениях отклонений расположения поверхностей или суммарных отклонений расположения и формы. Для измерения отклонений необходимо воспроизвести базовую систему координат (декартову или полярную), в которой должны осуществляться измерения, а затем в этой системе координат необходимо определить координаты точки с нулевым отклонением и одной или двух исследуемых (экстремально расположенных) точек, после чего оценить значение отклонения по модулю. При этом система координат может быть двухкоординатной или трехкоординатной в соответствии с числом заданных нормативной моделью баз (базовых элементов). В исключительных случаях система может быть однокоординатной.

В линейно-угловых (геометрических) измерениях «координатными измерениями» обычно называют измерения в двухкоординатной или трехкоординатной системах, что не вполне корректно, поскольку измерения в однокоординатной системе тоже являются координатными. Учитывая объемный характер деталей, измерения их линейных и угловых параметров следует рассматривать как многокоординатные, поскольку все геометрические параметры одной детали должны быть согласованы для образования целостного конструктивного элемента работоспособной сборочной единицы. Тем не менее, достаточно часто осуществляют измерения параметров в однокоординатной или двухкоординатной системах, поскольку общая для всей детали трехкоординатная система часто не задается в явном виде или вообще дробится на ряд систем с меньшим числом координат. Например, заданные допуск прямолинейности или допуск круглости требуют образования частных двухкоординатных систем, которые привязывают к реальным элементам, разрывая их связи с общей для всей детали трехкоординатной системой. Поля допусков формы, хотя и располагаются внутри полей допусков размеров, фактически имеют свои системы координат, отличные

от системы координат размеров детали. Подобная ситуация имеет место при определении систем координат для допусков расположения элементов, расположение которых рассматривают в системах координат, связанных с базовыми элементами.

Декомпозиция систем координат и их относительная автономность приводят к двум принципиально важным последствиям:

- возможность автономного контроля ряда параметров;
- необходимость согласованной оценки параметров.

Для автономного контроля параметров можно использовать накладные средства измерений (штангенциркуль, микрометр, индикаторная или рычажная скоба для охватываемых размеров, нутромер микрометрический или индикаторный для охватываемых размеров). Контроль такими приборами фактически осуществляются в «плавающей» системе координат, причем плавают не только начало отсчета (нулевая точка системы координат), но и ее направление (угол осевой линии системы). Например, так будут осуществляться измерения толщин номинально цилиндрической поверхности («диаметра») накладным прибором (рис. 1.2).

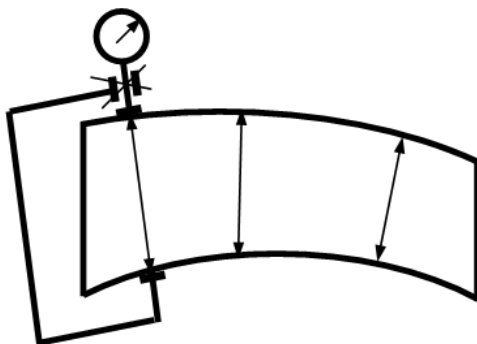


Рисунок 1.2 – Измерительный контроль детали накладным прибором

В результате мы имеем множество однокоординатных систем, которые в двухкоординатной системе имеют разные начала и непараллельные направления осей. Если полученные резуль-

таты интерпретируют, базируясь на допущении об измерениях в однокоординатных системах с параллельными осями и нулевыми точками на одном уровне, то в результаты измерений вносят неизвестную методическую погрешность.

Для согласованной оценки параметров в соответствии с тейлоровским истолкованием предельных размеров номинально цилиндрической поверхности из всех полученных результатов может быть использовано только наименьшее значение, которое не должно быть меньше нормированного наименьшего предельного размера поверхности.

Поскольку это является необходимым, но не достаточным условием, вторую оценку (диаметр описанного цилиндра) в принципе невозможно получить тем же средством измерений. Такую оценку можно получить при квалифицированном применении станкового прибора типа измерительной головки на стойке (рис. 1.3), одну из координатных осей которого воспроизводит рабочая плоскость стола, а вторую – направление линии измерения.

Приборы такого типа можно рассматривать как двухкоординатные с плавающей системой координат – горизонтальная координатная плоскость и нормально расположенная к ней в любом месте ось ординат.

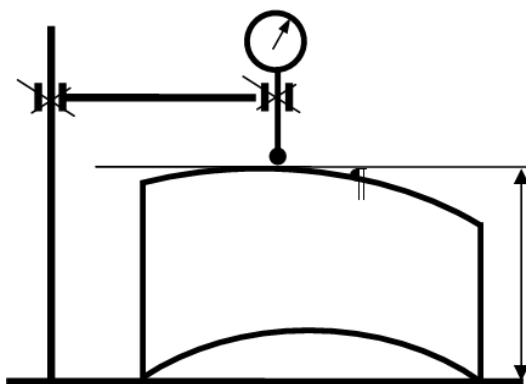


Рисунок 1.3 – Измерительный контроль наибольшего размера станковым способом

Чертеж детали по умолчанию подразумевает представление ее в трехкоординатной системе, где все элементы согласованы с помощью номинальных линейных и угловых размеров. Обязательные дефекты изготовления реальных поверхностей детали, даже при ограничении их назначенными полями допусков размеров, приводят к тому, что идеальную систему координат детали нельзя воспроизвести. Приходится прибегать к неким допущениям и условностям для однозначного (по возможности) воспроизведения систем координат при контроле каждого из размеров. При этом конвенционально устанавливаемые системы могут воспроизводиться на разных принципах – в качестве базовой поверхности могут быть использованы секущие или прилегающие элементы. Для построения предельных контуров поверхности может быть использована система координат, жестко связанная с базовым элементом (так нормируют поля допусков формы от среднего элемента) или с одним жестко привязанным предельным контуром, при втором «плавающем» (тейлоровская трактовка «предельных размеров», принятая для большинства полей допусков).

Технологическая декомпозиция единой трехкоординатной системы детали при обработке разных её поверхностей приводит к «умножению» и декомпозиции технологических систем координат автономно обрабатываемых поверхностей. Возможны и весьма реальны декомпозиции и автономные реализации систем координат при контроле параметров независимо изменяемых поверхностей.

Проектирование простых по конструкции и не слишком точных по размерам деталей позволяло достаточно успешно решать вопросы их изготовления и контроля. Усложнение формы деталей и повышение требований к их точности привели к необходимости дополнительного нормирования точности формы и расположения поверхностей. Первоначально нормировали только предельные отклонения формы и расположения поверхностей, более жестко ограниченные в пределах полей допусков соответствующих размеров. Однако следующим шагом, направленным на формализацию нормирования отклонений формы и

расположения, стало нормирование полей допусков формы и расположения важнейших функциональных элементов деталей.

Появление полей допусков формы и расположения поверхностей привело к диверсификации систем координат деталей. Наряду с номинально увязанными между собой в одну систему координат полями допусков размеров появились относительно автономные системы координат для полей допусков формы и расположения поверхностей. Например, поле допуска прямолинейности узкой грани хотя и не выходит за пределы поля допуска соответствующего размера, однако имеет собственную систему координат, которая и по расположению нулевой точки и по направлению осей может не совпадать с системой координат поля допуска размера (рис. 1.4). Аналогичные рассуждения можно провести для других полей допусков формы и расположения поверхностей.

Декомпозиция систем координат и их относительная автономность привели к необходимости отдельного контроля параметров с реализацией для каждого из них собственной системы координат. При этом возникает опасность «разрывов» целостности комплексного поля допуска детали, а значит и опасность недостаточной представительности поэлементного контроля параметров для оценки работоспособности детали даже в случае положительных результатов комплексного измерительного приемочного контроля в автономных системах координат.

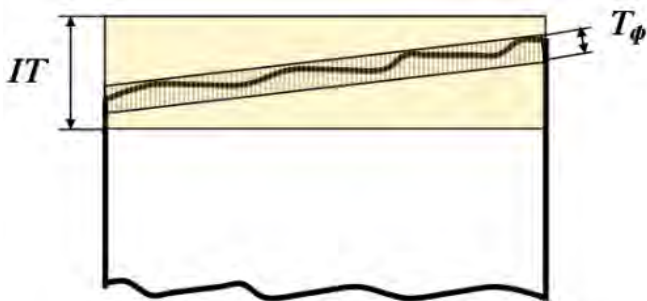


Рисунок 1.4 – Поля допусков размера и формы

Причинами методических погрешностей, которые возникают при раздельном контроле всего комплекса нормированных параметров детали, могут быть не вполне корректно принятые допущения о согласованности нормированных полей допусков, а также некорректная идеализация воспроизведения базовых элементов, а, следовательно, и систем координат при реализации измерительного приемочного контроля.

Появление и сравнительно широкое распространение трехкоординатных измерительных приборов позволяет поставить вопрос о комплексном контроле всех нормированных параметров детали в одной системе координат или в нужном числе систем, строго согласованных между собой. В такой ситуации возникает вопрос о возможности и необходимости пересмотра методологии назначения полей допусков. Вместо декомпозиции общего поля допуска размера на поля допусков собственно размера, поля допуска формы поверхностей и поля допуска их расположения (или интегрального поля допуска формы и расположения), возможно, следует вернуться к назначению функционально оправданных более узких полей допусков размеров. Современные технологические возможности изготовления и контроля деталей делают такую систему вполне конкурентоспособной по сравнению с ныне широко используемой тейлоровской системой.

1.2 Структура метрологического обеспечения координатного контроля деталей машиностроения

Структура системы метрологического обеспечения (МО) координатного контроля имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой решаемых задач. Их сложность и объем постоянно возрастают, причем даже в условиях изменения темпов производства эта тенденция сохраняется.

Нами рассматривается метрологическое обеспечение координатных измерений в машино- и приборостроении в рамках общей концепции обеспечения качества производства продукции [10]. Качество метрологического обеспечения – это такая совокупность свойств, методов, средств и процедур метрологического обеспечения, которая придаёт результатам измерений способность удовле-

творять потребности контроля, испытаний и исследований с использованием средств измерений. К свойствам, составляющим эту совокупность по нашему мнению следует отнести:

– системность – свойство, характеризующее способность элементов совокупности находиться в определенных отношениях и связях между собой, образуя при этом определенную целостность и единство. Метрологическое обеспечение, обладающее таким свойством должно представлять собой единую систему, включающую научные положения, организационные принципы, правила, нормы и технические средства, определяющие технологию его осуществления и обеспечивающие его реализацию;

– комплексность – свойство, характеризующее вхождение в систему всех элементов и связей, которые необходимы для организации и стабильного функционирования метрологического обеспечения производства;

– прогрессивность – свойство, характеризующее использование в системе МО современных методов, средств и процедур. Под современными методами, средствами и процедурами следует понимать такие, которые обеспечивают функциональное соответствие системы современным производственным требованиям и не являются морально устаревшими;

– прогнозируемость – свойство, характеризующее предсказуемость результатов функционирования системы. Основой прогнозируемости является научное обоснование метрологического обеспечения, его организационных принципов, правил, норм и технических средств;

– нормосоответствие – свойство, определяющее выполнение в ходе МО всех требований нормативной документации, обеспечивающей единство измерений. Причинами нарушения нормосоответствия может быть либо несоблюдение требований действующих нормативных документов, либо отсутствие однозначно установленных норм в документах, например, при использовании нестандартизованных СИ;

– экономичность — свойство, уровень которого определяется затратами на организацию и осуществление метрологического обеспечения.

Очевидно, что координатные измерения в общем случае реализуются в два этапа. На первом этапе получают первичную измерительную информацию в виде массива координат контрольных точек детали, на втором производят обработку (математическую, графическую, графо-аналитическую) этой информации, в результате чего определяют искомые значения геометрических параметров.

Основной особенностью метрологического обеспечения операционного координатного контроля является то, что в его структуре можно выделить два направления: метрологического обеспечения координатных измерений и метрологическое обеспечение обработки результатов измерений. Это связано с показанной выше необходимостью выполнения математической обработки большого объема измерительной информации, а методическая составляющая погрешности измерения, связанная с несовершенствами методики измерения и обработки результатов измерения, может значительно превышать инструментальную составляющую погрешности. На примере измерения отклонения формы поверхности, очевидно, что применение неоптимального алгоритма воспроизведения реальной поверхности по координатам контрольных точек либо некорректное построение прилегающей поверхности может привести к получению результата измерения с большой погрешностью.

Одной из важнейших задач, объединяющей оба направления метрологического обеспечения машиностроительного производства, является проектирование методик выполнения измерений (МВИ) для измерительного контроля геометрических параметров изделий. Структуру системы метрологического обеспечения такого контроля можно изобразить в виде схемы, представленной на рис. 1.5.

В соответствии с ГОСТ 8.010-99 под методикой выполнения измерений понимают совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленной точностью.

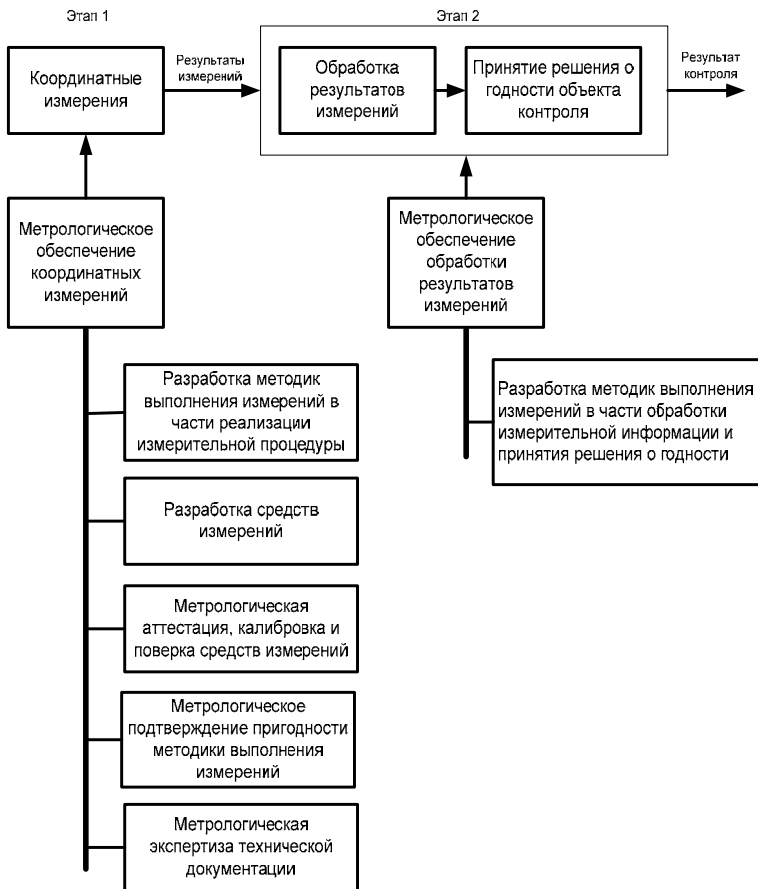


Рисунок 1.5 – Структура метрологического обеспечения операционного контроля в машиностроении

Основу проектирования любой МВИ составляет общий алгоритм процесса измерения, рассмотренный в работе Ю.В. Тарбеева и Т.Н. Сирой [11].

В структуре процесса измерения авторы выделяют взаимосвязанные подэтапы в рамках каждого этапа (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Структура процесса измерения

Этапы измерения	Основные подэтапы
Постановка задачи измерения	<ul style="list-style-type: none"> • Анализ априорной информации • Формирование модели объекта измерения • Определение измеряемой параметра • Формулировка основных уравнений измерения
Планирование измерения	<ul style="list-style-type: none"> • Выбор метода измерения • Выбор СИ • Предварительный выбор алгоритма обработки данных • Априорная оценка погрешности измерения • Выбор параметров эксперимента (числа наблюдений, точек и времени выполнения наблюдений)
Измерительный эксперимент	<ul style="list-style-type: none"> • Взаимодействие СИ с объектом измерения • Преобразование сигнала измерительной информации • Воспроизведение сигнала заданного размера • Сравнение сигналов и регистрация результата
Обработка экспериментальных данных	<ul style="list-style-type: none"> • Анализ исходных данных и выбор алгоритма обработки • Вычисление результата измерения и показателей его погрешности • Анализ и интерпретация полученных результатов

Как видно, практически на каждом этапе измерительной процедуры применяется моделирование объекта измерения либо СИ, а также взаимодействия между ними и окружающей средой. В ряде случаев применяют имитационное моделирование всей измерительной процедуры с целью поиска путей ее оптимизации по выбранным критериям. Можно сделать вывод, что моделирование является одним из основных инструментов исследования при проектировании структуры измерительной процедуры. Учитывая это обстоятельство, целесообразным представляется введение понятие метрологической модели и дальнейшее развитие теории метрологического моделирования.

1.3 Метрологические модели объектов измерительного контроля

Понятие «метрологическое моделирование» пока не нашло широкого применения в метрологии, несмотря на исключительную важную роль моделирования в измерениях. Пока значение и

возможности метрологического моделирования теоретически не раскрыты и, как правило, недостаточно используются в практике измерений. Когда практик занимается «измерением детали», а теоретик «измерением физической величины», оба имеют в виду измерение физических величин, характеризующих параметры конкретного объекта. Здесь под параметрами понимаются свойства, определяемые физическими величинами, и поэтому подлежащие объективному количественному оцениванию. Принципиальное различие между двумя подходами заключается в принимаемых для измерений моделях: практик связывает измерения с нормированными параметрами реального объекта, а теоретик говорит об измерениях физических величин, которые как бы воспроизводятся на измеряемом объекте идеальным образом.

Методика выполнения измерений может рассматриваться как модель, описывающая измерительную процедуру и включающая модели объекта измерений, среды в рабочей зоне, средств измерений и вспомогательных устройств. Интегральная модель методики выполнения измерений необходима для анализа погрешностей измерений или оценки неопределенностей.

Модели физических величин разработаны и узаконены в стандартах на физические величины и их единицы. Для разработки МВИ необходимо только идентифицировать измеряемый параметр как узаконенную физическую величину. Очевидна необходимость идентификации измеряемой физической величины, поскольку без этого нельзя выбрать вид средств измерений.

Модель измеряемого параметра также имеет весьма существенно значение для разработки МВИ. Особое значение имеют инструментальная доступность параметра, вид его реализации и число фактических реализаций на объекте. Например, существенно различаются по виду реализации такие параметры, как высота детали и глубина глухого отверстия в ней. Некоторые параметры определяют экстремальным значением (наибольшая глубина водоема, отклонение формы реальной поверхности от номинальной), некоторые – средними (например, среднее квадратическое отклонение микронеровностей поверхности). Кроме

того, некоторые параметры требуют специального истолкования, как, например, отклонения формы поверхности, которое можно отсчитывать от средней или от прилегающей поверхности, каждую из которых строят по определенным правилам.

Число фактических реализаций параметра на реальном объекте фактически имеет альтернативный вид: параметр может воспроизводиться на объекте однократно (например, максимальная высота микронеровностей поверхности), либо бесконечное число раз (толщина стержня, площадь его поперечного сечения).

Из сказанного следует, что моделирование (идентификация) измеряемого параметра существенно отличается от идентификации измеряемой физической величины. Идентификация измеряемого параметра необходима для корректного построения МВИ. В формулировку условий измерительной задачи входит корректная характеристика измеряемого параметра. Поэлементное описание задачи измерения может быть таким:

- измеряемая физическая величина – длина;
- измеряемый параметр – охватываемый размер, ограниченный номинально цилиндрической поверхностью;
- число фактических реализаций параметра на реальном объекте – бесконечность;
- искомое значение параметра – длина произвольно расположенного на объекте контрольного сечения, определяемая как расстояние между двумя параллельными прямыми, проходящими по касательным к диаметрально противоположным участкам профиля сечения.

В более подробное описание задачи измерения могут войти дополнительные элементы, например, уточнение измеряемого параметра: охватываемый размер, представляющий собой узкую поперечную канавку на номинально цилиндрической поверхности (дополнительно могут быть представлены глубина и ширина канавки).

Для оценки годности объекта по результатам измерений нужна иная методика (методика измерительного контроля). В

условия задачи должны входить правила установления годности в соответствии с нормированными предельными значениями параметров. Разрабатываемая методика измерений (измерительного контроля) должна обеспечивать нахождение экстремальных значений, пригодных для адекватного сопоставления экспериментальных данных с установленными нормами.

Любые «измерения объектов», «измерения физических величин объектов», «измерения параметров объектов» если их рассматривать с позиций моделирования сводятся к использованию результатов измерений для построения модели, которая адекватно (в рамках поставленной задачи) отражает существо исследуемого объекта. Модель может отражать отдельную физическую величину, их совокупность или определенным образом построенную систему физических величин, принадлежащих одному объекту. Модель объекта может создаваться на основании априорной информации, но, как правило, корректируется по результатам измерений (рис. 1.6).

В метрологии фактически используют множество моделей объектов измерений, основными из которых можно считать нормативную модель объекта, аналитические модели (идеальную и реалистическую) и экспериментальную модель объекта.

Нормативная модель объекта создается в процессе проектирования и оформляется технической документацией (чертеж, техническое описание, технические условия и т.д.), она содержит все параметры объекта, необходимые для его создания. Нормативная модель объекта, представляет собой заданную семантически область существования годного объекта со всеми допустимыми отклонениями параметров. Эта же модель используется для контроля параметров искусственно созданного объекта (результатов или режимов технологических операций и/или технологического процесса в целом). В соответствии с последним положением можно утверждать, что параметры метрологической нормативной модели объекта полностью соответствует параметрам его нормативной модели.

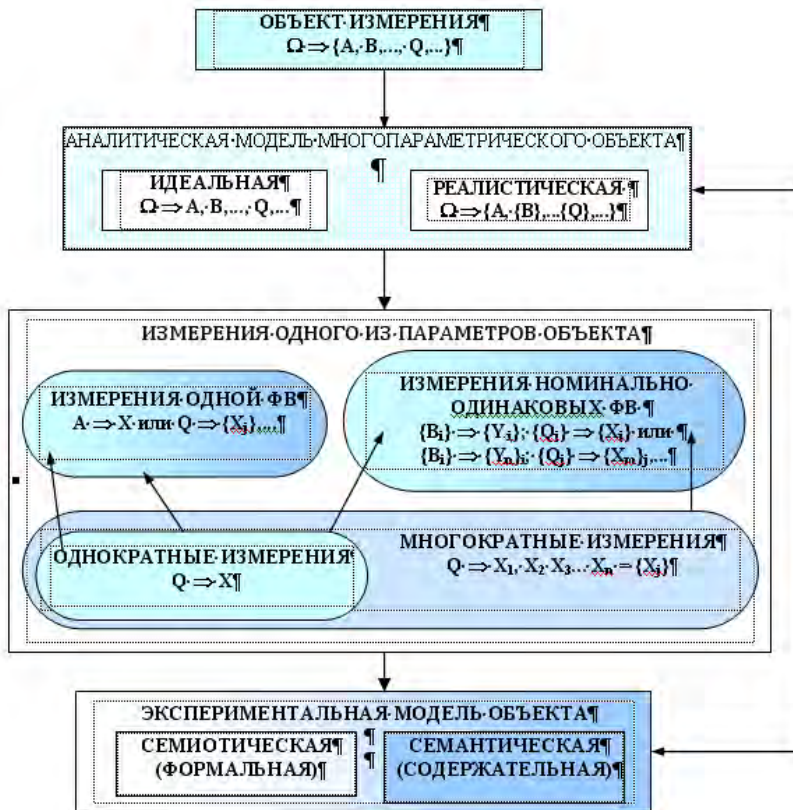


Рисунок 1.6 – Создание экспериментальной модели по результатам измерений параметров объекта

Отличительными признаками метрологической нормативной модели объекта являются ее функциональное назначение (модель применяют при контроле объекта) и возможная неполнота информации (могут создаваться модели для контроля каждого отдельного параметра объекта, включающие необходимый минимум информации). Контроль отдельного параметра объекта можно рассматривать как создание экспериментальной модели объекта, построенной по результатам измерений данного пара-

метра, сопоставление этой модели с нормативной и выработка заключения о годности объекта.

Очевидно, что нормативная модель объекта не совпадает с идеальной моделью, которая строится по однозначно определенным (например, номинальным) параметрам. Так, в качестве идеальной модели шара можно рассматривать сферу определенного радиуса, идеальной моделью ролика или диска является прямой круговой цилиндр с фиксированными значениями диаметра и длины между торцами. В качестве нормативной модели цилиндрической поверхности ролика можно использовать пространство между двумя идеальными цилиндрическими поверхностями, в которое должна вписаться реальная поверхность. Цилиндры могут быть концентрическими либо расположенными друг относительно друга иным образом, а расположенное между ними пространство называют полем допуска диаметра. Возможно и иное истолкование предельных размеров вала, в частности по Тейлору (принятое в международных и национальных стандартах), которое дает достаточно сложную модель. В ней прилегающий к реальной наружной поверхности геометрически правильный цилиндр не должен превышать заданного (наибольшего предельного) размера, а толщина реальной поверхности в любом сечении не должна быть меньше второго заданного (наименьшего предельного) размера.

Как видно из приведенных примеров, нормативная модель отличается от идеальной наличием полей допусков, которые вместе с номинальными параметрами образуют конвенциональную координированную систему. В частности, в тейлоровской модели поле допуска диаметра «плавает» по нормали к оси цилиндра.

Составляющими частями нормативной модели объекта являются:

- значения параметров (H , L , d и др.) с допусками T (формальная составляющая);

- поля допусков параметров (содержательное оформление параметров с допусками в координатную систему, которая определяет область существования годных объектов контроля).

Нормативная модель объекта предполагает жесткое ограничение предельных числовых значений параметров, то есть допускает их рассеяние в пределах поля допуска, в результате возможно определенное разнообразие реализаций нормированных объектов. Например, номинально цилиндрическая поверхность с заданным полем допуска диаметра из-за несовершенства технологических процессов может быть изготовлена как конусообразная, бочкообразная, седлообразная или усеченная тороидная (если рассматривать простейшие искажения поверхности вдоль ее оси). Можно также представить более сложную комбинированную поверхность, например объединяющую несколько вариантов описанных поверхностей (тороидность и конусообразность) и дополненную искажениями формы в поперечном сечении. Именно такие рассуждения приводят к необходимости создания реалистической аналитической модели поверхности, которую кладут в основу разработки методики выполнения измерений.

Поскольку даже для одной простейшей поверхности может существовать некоторое количество вариантов реалистической аналитической модели, разрабатываемая методика выполнения измерений должна покрывать все варианты. Если такую методику разработать нельзя из-за инструментальных или операционных ограничений, приходится использовать несколько взаимно дополняющих друг друга методик. Например, при измерении номинально цилиндрических поверхностей можно рассматривать два обобщенных варианта регулярной реалистической аналитической модели поперечного сечения (четная огранка, включая овальность, и нечетная огранка). Нечетная огранка двухточечными измерениями не выявляется, поэтому некоторые виды средств измерений принципиально не могут обеспечить полноту воспроизведения определенных экспериментальных моделей, а следовательно появляется необходимость разработки минимум двух дополняющих друг друга методик выполнения измерений.

Экспериментальную метрологическую модель объекта создают на базе информации о фактических значениях параметров контролируемого объекта. Информацию получают с помощью

измерений соответствующих физических величин, носителем которых является объект. Экспериментальная метрологическая модель реализуема только в том случае, если принять три основных постулата:

- каждый объект следует рассматривать как упорядоченное множество (систему) разноименных и одноименных физических величин;
- каждая из физических величин, принадлежащих данному объекту, может воспроизводиться на этом объекте однократно либо многократно – как бесконечное множество номинально одинаковых величин;
- любое бесконечное множество номинально одинаковых величин может быть представлено конечным множеством результатов измерений, выполненных в минимально необходимом числе рационально распределенных контрольных точек (контрольных сечений).

Экспериментальная модель всегда является значительно редуцированной по отношению к бесконечному множеству значений параметров реального объекта. Первоначальные варианты экспериментальной модели создаются по данным измерений, проводимых на основе использования реалистической аналитической модели. При необходимости характер экспериментальной модели можно уточнить в соответствии с результатами выполненных измерений и настолько приблизить к реальному объекту, насколько это требуется для решения поставленной задачи измерений. Таким образом, экспериментальную метрологическую модель фактически создают методом проб и ошибок. Экспериментальная модель объекта необходима при решении любой задачи измерений, вне зависимости от того, существует ли нормативная модель (с ее наличием связаны задачи измерительного контроля деталей, процессов, технологического оборудования и средств измерений, идентификации объектов и др.) или нормативной модели не существует (задачи измерений, возникающие в ходе различных экспериментальных исследований).

Когда модель построена, необходимо проверить справедливость всех принятых при ее построении допущений (общих и конкретных), а также адекватность модели.

Адекватность модели может рассматриваться в разных аспектах:
– адекватность по цели (модель соответствует целям исследования);

– адекватность по исходным данным (необходимая для использования в качестве исходных данных информация может быть получена в достаточном объеме с удовлетворительной точностью);

– адекватность по полноте (модель включает все необходимые для исследования переменные, а также учитывает связи между переменными);

– адекватность по управлению (модель включает все необходимые регулируемые переменные и такие возможности их изменения, которые обеспечивают эффективное управление ходом исследования);

– адекватность по результативности (исследование модели позволяет в приемлемые сроки получать решения, при переносе которых на реальную систему прогнозируемые эффекты воспроизводятся с достаточной точностью и представительностью).

Очевидно, что главным свойством модели является адекватность по результативности, и что она может быть обеспечена только при соблюдении всех предыдущих условий адекватности.

Рассмотрим примеры моделей разных объектов измерений. Формальная метрологическая модель любого объекта может быть описана математическим выражением

$$\Omega \Rightarrow \{A, B, \dots, Q, \dots\}, \quad (1.2)$$

где Ω – объект измерения,

A, B, \dots, Q – физические величины, принадлежащие объекту измерения.

Выражение (1.2) можно прочесть «объекту Ω соответствует определенное множество физических величин, что позволяет рассматривать его как соответствующее множество $\{\Omega\}$ ». Если иметь в виду, что по крайней мере некоторые из физических величин, входящих в множество $\{A, B, \dots, Q, \dots\}$, сами могут быть представлены в виде множеств, которые являются подмножествами более общего множества, можно записать

$$\Omega \Rightarrow \{A, B, \dots, \{L\}, M, \dots, \{Q\} \dots\} \quad (1.3)$$

$$\text{или } \{\Omega\} = \{A, B, \dots, \{L\}, M, \dots, \{Q\} \dots\}, \quad (1.4)$$

где A, B, M – элементы множества всех физических величин, принадлежащих объекту Ω и являющиеся единичными физическими величинами, что можно представить как

$$A \in \{\Omega\}, B \in \{\Omega\}, M \in \{\Omega\}, \quad (1.5)$$

$\{L\}, \{Q\}$ – подмножества множества $\{\Omega\}$, являющиеся множествами физических величин, или при формальной записи

$$\{L\} \subseteq \{\Omega\}; \{Q\} \subseteq \{\Omega\}. \quad (1.6)$$

Подмножество $\{Q\}$ считается множеством физических величин только в том случае, если на объекте фактически воспроизводится не одно фиксированное значение Q , а бесконечное множество номинально одинаковых физических величин. Таким образом, в качестве подмножества $\{Q\}$ можно рассматривать множество высот призматической детали, но, ни в коем случае не комплекс длин призмы типа «высота + толщина + ширина + длина диагонали», поскольку каждая из этих длин реализована на детали соответствующим множеством номинально одинаковых величин.

Под единичными физическими величинами понимают те, которые реализованы на объекте однократно, например такие, срединный размер плоскопараллельной концевой меры длины, максимальная высота и т.д.

Каждая из интересующих нас величин (как единичная, так и входящая в множество номинально одинаковых величин) может быть измерена однократно либо многократно. Для первого случая

$$Q \Rightarrow X, \quad (1.7)$$

где Q – измеряемая физическая величина,

X – результат измерения физической величины.

При многократных измерениях одной физической величины получим

$$Q \Rightarrow X_1, X_2 \dots X_n, \quad (1.8)$$

где Q – измеряемая физическая величина,

$X_2 \dots X_n$ – результаты повторных измерений физической величины.

При этом в соответствии с накладываемыми на процесс измерений ограничениями последнее выражение подразумевает, что $n \neq \infty$, причем $n \ll \infty$, а в качестве оценки одной многократно измеренной физической величины может быть выбран некий представитель ряда полученных результатов, например среднее арифметическое значение X_{cp}

$$X_{\text{cp}} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i \quad (1.9)$$

Многочисленные измерения одной и той же физической величины могут быть направлены либо на повышение достоверности измерений за счет обнаружения и исключения результатов с грубыми погрешностями, либо на анализ случайных и переменных систематических составляющих погрешности в серии измерений. Следовательно, многочисленные измерения одной и той же физической величины не имеют непосредственного отношения к построению экспериментальной модели объекта.

Если на объекте фактически воспроизводится не одно фиксированное значение физической величины Q , а бесконечное множество номинально одинаковых физических величин $\{Q\}$, то для получения адекватной модели объекта исследования в ряде случаев приходится измерять N разных величин, входящих в множество $\{Q\}$. В соответствии с третьим постулатом желательно чтобы число контрольных точек (контрольных сечений) N соответствовало минимально необходимому, а их расположение было оптимальным. Таким образом, можно утверждать, что для построения экспериментальной модели объекта физические величины множества $\{Q\}_i$ транспонируются на множество результатов измерений $\{X_N\}$, причем число подлежащих измерению физических величин N много меньше бесконечного числа физических величин составляющих множество $\{Q\}_i$.

$$\{Q\}_i \Rightarrow \{X_N\}, \quad (1.10)$$

где $\{Q\}_i = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_j\}$, при $j = \infty$, а $\{X_i\} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, и $N \ll \infty$.

Рассмотрим применение метрологических моделей объектов в таких наиболее часто решаемых задачах как измерительный приемочный контроль детали. В условия задачи входят заданная чертежом нормативная модель объекта, и реальный объект, который по условиям годности должен соответствовать этой модели.

Чтобы дать заключение о годности, необходима экспериментальная модель объекта, которую строят на базе измерительной информации о фактических значениях параметров контролируемого объекта. Рассмотрим один из простейших объектов приемочного контроля – деталь в виде цилиндра с диаметром d , с двумя плоскими торцами на длине L , нормальными оси цилиндра, и двумя фасками под углом 45° длины l вдоль оси (рис. 1.7).

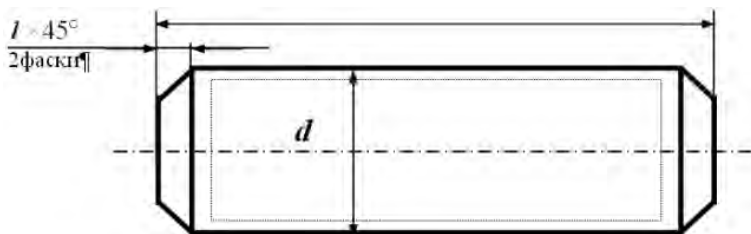


Рисунок 1.7 – Ролик цилиндрический с фасками

Все геометрические параметры следует рассматривать как фактические множества номинально одинаковых физических величин, причем число элементов каждого такого множества равно бесконечности. Очевидно, что деталь имеет бесконечные множества диаметров $\{d\}$, длин цилиндра $\{L\}$, длин фаски 1 $\{l_1\}$ и длин фаски 2 $\{l_2\}$. То же можно сказать об углах фасок, параметрах микрогеометрии поверхностей, твердости разных участков поверхностей и т.д.

Для данной детали зависимость (1.11) с учетом конкретных параметров может быть записана в виде

$$\Omega \Rightarrow \{d\}, \{L\}, \{l_1\}, \{l_2\}. \quad (1.11)$$

Для корректного заключения о годности контролируемого объекта измерению подлежат все его нормированные параметры, причем каждая из физических величин (составляющих множество номинально одинаковых величин) может быть измерена однократно, либо многократно.

В основу разработки предварительной методики выполнения измерений для выбора минимально необходимого числа измеряемых физических величин N и правильно распределенных контрольных точек (контрольных сечений) составляем реалистическую аналитическую модель объекта, которая отличается от идеальной предполагаемыми технологическими искажениями. Всем известна традиционно применяемая типовая схема измерений номинально цилиндрической поверхности. Поверхность контролируют в шести контрольных сечениях: в трех поперечных плоскостях (средней и двух близких к крайним сечениям) с поиском двух взаимно перпендикулярных экстремальных размеров в каждой плоскости. Схема основана на допущении возможности таких элементарных искажений формы, как седлообразность и бочкообразность в продольном сечении (конусообразность выявляется по умолчанию) а также овальность – в поперечном. Очевидно, что традиционно применяемая схема окажется непродуктивной, если образующую нужно аппроксимировать синусоидой. Кроме того, контроль накладным двухточечным средством измерений не способен выявить изогнутость оси и нечетную огранку поперечного сечения.

Экспериментальная модель, используемая для принятия решения о годности объекта по одному или нескольким контролируемым параметрам, должна быть адекватна объекту в рамках поставленной задачи измерения (в данном случае это измерительный приемочный контроль). Возможно построение двух видов экспериментальных моделей:

- формальная (семиотическая) модель, которую можно использовать, например, при заключении о годности объекта по единичной физической величине;

- содержательная (семантическая) модель, которую используют для заключения о годности объекта по некоторому множеству номинально одинаковых физических величин типа диаметра цилиндрической поверхности.

Не следует считать, что формальная модель объекта лишена содержания, просто ее содержание редуцировано до элементарной формы типа

$$M_{\min} \leq M \leq M_{\max}, \quad (1.12)$$

где M_{\min} и M_{\max} – предельно допустимые значения параметра, M – экспериментально определенное (измеренное) значение параметра.

Из выражения (1.12) следует, что для заключения о годности реальную модель объекта сравнивают с множеством $\{M_{\min} \dots M_{\max}\}$ идеальных аналитических моделей и признают объект годным, если реальная модель входит в это бесконечное (континуальное) ограниченное предельными значениями множество. Формальная экспериментальная модель цилиндрической поверхности может быть представлена рядом результатов измерений без указаний положений контрольных сечений. Если нормативная модель ограничивает требования к поверхности только предельными размерами, то адекватная формальная экспериментальная модель вполне пригодна для заключения о годности.

Содержательная модель поглощает формальную, т.е. включает в себя множество результатов измерений номинально одинаковых физических величин. Отличия заключаются в том, что эти результаты выстраивают в определенную систему на базе реалистической аналитической модели объекта, уточняемой в ходе получения измерительной информации. Содержание системной модели не ограничивается числовыми значениями, оно должно включать схему контрольных точек (контрольных сечений) и/или вербальное описание, а возможно и другие семантические элементы, обязательные для заключения о годности объекта по некоторому параметру. Порядок построения экспериментальной модели по результатам измерений параметров объекта с учетом обратных связей схематически представлен на рис.1.5.

Очевидными задачами, решаемыми с помощью измерений, кроме измерительного приемочного контроля являются также операционный контроль, арбитражная перепроверка результатов проведенных измерений, идентификация объектов, экспериментальное исследование объекта или множества однородных объектов. Для каждого из перечисленных случаев построение метрологических моделей является обязательным этапом решения поставленных измерительных задач. При построении моделей можно использовать предложенные выше приемы анализа моделируемых объектов.

Измерения в ходе экспериментальных исследований осуществляются для решения разных задач, хотя преследуют общую цель – получение адекватной модели исследуемого объекта, причем степень адекватности определяют конкретные цели исследований. Сложность построения метрологической модели исследуемого объекта, которая необходима для разработки методик измерений, определяется как объективными причинами (фактор незнания), так и субъективными (фактор непонимания).

К объективным сложностям относится недостаточность априорной информации (если бы все было известно, не нужно было бы проводить исследование). Уменьшить влияние «фактора незнания» помогают теоретические исследования, удачная гипотеза и обязательно – корректировка метрологической модели исследуемого объекта и методики измерений, проводимая по результатам, полученным в ходе проведения исследований.

«Фактор непонимания» в некоторой степени связан с обязательным недостатком априорной информации, но в значительно большей степени обусловлен недостаточной квалификацией исследователя.

Метрологические модели не исчерпываются только моделями измеряемых объектов, они включают в себя разнообразные модели средств измерений, модели измерительных операций, модели процессов измерений и других измерительных процедур.

Моделирование средств измерений – особая область метрологического моделирования. Простейшим средством измерений

является однозначная мера. Поскольку такая мера (Ω) предназначена для хранения и воспроизведения физической величины (Q) одного размера, ее идеальная модель записывается простейшим выражением

$$\Omega \Rightarrow Q. \quad (1.13)$$

Реалистическая аналитическая модель однозначной меры строится в зависимости от характера физической величины, воспроизводимой мерой, и конкретной измерительной задачи, в которой эта мера задействована. Например, модель меры массы (гири, разновеса) полностью соответствует идеальной. Отличной будет модель меры длины ($\Omega \Rightarrow \{L_1, L_2, L_3, \dots\}$). При использовании плоскопараллельной концевой меры длины для настройки прибора считают, что реалистическая модель меры практически совпадает с идеальной.

При определении годности самой меры длины и ей подобных (измерительный приемочный контроль меры) или при ее аттестации в качестве образцовой меры реалистическая модель должна быть увязана с сущностью воспроизводимой физической величины и в частности может предстать как бесконечное множество $\{Q_1, Q_2, Q_3, \dots\}$ номинально одинаковых величин

$$\Omega \Rightarrow \{Q_1, Q_2, Q_3, \dots\}. \quad (1.14)$$

Схема построения моделей однозначной меры представлена на рис. 1.8.

Для измерительных преобразователей или измерительных приборов в зависимости от поставленных целей могут разрабатываться весьма разнообразные и сложные метрологические модели.

На сегодняшний день единого подхода к построению метрологических моделей не существует, а в литературных источниках [12-14] рассматриваются, главным образом, отдельные математические приемы построения моделей объектов контроля и СИ.



Рисунок 1.8 – Моделирование однозначной меры

Так в монографии [14] автор рассматривает самый общий подход к метрологическому моделированию. Исходным пунктом построения модели служит априорная информация о конкретной метрологической ситуации, а сама метрологическая модель представляется в виде иерархической структуры понятий, описывающих ограниченное множество метрологических ситуаций.

Необходимо отметить, что предлагаемая автором методология построения метрологической модели носит весьма общий характер и обладает высокой степенью абстракции. Достоинством предлагаемой методологии является ее применимость к широкому спектру объектов, включающих объекты измерения, СИ, а также связи между ними. Однако реализация такого подхода требует выполнения трудоемкой процедуры составления тезауруса понятий, их формализации, что ставит под сомнение эффективность практического применения настолько общего подхода к метрологическому моделированию.

В работе Б.Я. Советова [14] анализируется применение системного, структурного и функционального подходов при построении моделей различных объектов. При этом предлагается рассматривать системный подход как методологическую основу

моделирования, а структурный и функциональный подходы – как методы подробного описания рассматриваемой системы. Для операционного координатного контроля можно применить системный подход к измерительной процедуре по аналогии с алгоритмом, предлагаемым работе [11]. В таком случае объект, средство и процесс контроля необходимо рассматривать как взаимосвязанные элементы, требующие построения соответствующих метрологических моделей. Очевидно, что при реализации такого подхода необходимо разработать три класса метрологических моделей: объекта, процесса и средства контроля. Объединение данных моделей в единый комплекс позволит создать комплексную методологию построения и применения метрологических моделей.

Предлагаемый Б.Я. Советовым подход к метрологическому моделированию представляется вполне логичным и обоснованным. Однако для практического применения данного подхода необходимо разработать методологию построения каждого класса моделей в отдельности.

Необходимо отметить, что вопросы, связанные с построением метрологических моделей объектов контроля, нашли рассмотрение в работах [15-21]. Вместе с тем, все данные работы рассматривают построение модели такого рода в качестве отдельно решаемой узкой математической задачи, причем в каждой работе предложен свой подход к ее решению. Отсутствие единой методологии построения метрологических моделей является недостатком таких методологических решений.

В качестве примера рассмотрим подход к моделированию объектов координатного контроля, предложенного нами в работе [16]. Предлагается разделить физические и аналитические методы моделирования объектов контроля в зависимости от способа построения модели.

К первой группе моделей отнести все традиционные методы измерения, при использовании которых всякой контролируемой поверхности в результате физического измерительного преобразования ставится в соответствие ее модель в виде массива исходной измерительной информации, представленного в той

или иной форме (это может быть таблица координат контролируемых точек, совокупность кривых, характеризующих реальную форму контролируемых профилей, интерференционная картина и др.). Такая модель может быть непосредственно использована для оценки размеров и отклонений формы контролируемой поверхности, т.е. можно утверждать, что все эти методы предусматривают прямые измерения. Отсюда делается вывод, что методы физического моделирования отличаются тем, что при их реализации в результате физического преобразования, лежащего в основе прямых измерений отклонений всех выделенных точек, устанавливается такое взаимно-однозначное соответствие между объектом измерения и его моделью, при котором каждой контролируемой точке реальной поверхности ставится в соответствие одна единственная точка модели.

Во вторую группу входят методы измерений, при использовании которых всякой контролируемой поверхности ставится в соответствие ее модель в виде непрерывной аппроксимирующей поверхности, воспроизводимой аналитически по результатам измерения отклонений минимально необходимого, но достаточного (оптимизированного) с точки зрения решаемой измерительной задачи количества контролируемых точек. В этом случае отклонения размеров и формы контролируемой поверхности оцениваются по полученной аналитической модели, значит, есть основания утверждать, что реализуется косвенное измерение, а методы, входящие в эту группу, являются косвенными. При реализации такого подхода к моделированию в результате аналитического преобразования исходной измерительной информации устанавливается такое взаимно однозначное соответствие между объектом измерения и его моделью, при котором каждой точке реальной поверхности ставится в соответствие одна единственная точка модели. Причем, в таком преобразовании участвуют все без исключения точки реальной поверхности (которых бесчисленное множество) и даже те, координаты которых не подвергались непосредственному измерению.

К особенностям данного подхода можно отнести применение в качестве моделей поверхности детали аналитически воспроиз-

водимые, то есть номинальные в математическом смысле поверхности. При этом бесконечному множеству реализаций поверхности детали ставится в соответствие конечное множество номинальных поверхностей. Очевидно, что при этом может возникать определенная методическая составляющая погрешности.

В работе [22] предлагается использовать три класса метрологических моделей объектов контроля для случая координатного контроля геометрических параметров деталей: дискретные, аналогово-дискретные и аналоговые.

При использовании любого из дискретных методов измерений получают дискретную модель контролируемой поверхности в виде массива измеренных координат ограниченного количества контрольных точек, характерным образом расположенных на поверхности. Произведя необходимую обработку полученных результатов измерения, находят отклонения размеров и формы контролируемой поверхности.

Аналогово-дискретные модели получают при использовании ряда автоматизированных СИ. Особенность таких средств состоит в том, что они позволяют осуществлять непрерывное измерение отклонений точек и представлять измерительную информацию в виде непрерывных кривых, характеризующих реальную форму профилей контролируемой поверхности. Совокупность такого рода кривых, относящихся к различным нормальным сечениям реальной поверхности, и определяет измеренную поверхность, которая в данном случае может считаться аналогово-дискретной (описывается рядом дискретно расположенных аналоговых профилей). При дальнейшей обработке такой исходной измерительной информации с целью нахождения отклонений размеров и формы контролируемой поверхности ее измеренные аналоговые профили подвергаются вторичной дискретизации. В расчет принимаются отклонения отдельных точек профилей, располагающихся на записанных кривых с определенным шагом. В итоге такой операции аналогово-дискретная измеренная поверхность преобразуется в некоторую дискретную модель реальной поверхности.

Аналоговые модели получают, например, с помощью оптических приборов, основанных на явлении интерференции света. Такого типа приборы позволяют получить полную информацию о рельефе контролируемой поверхности.

Анализ разработанной системы классификации позволил выдвинуть гипотезу о возможности разработки методов измерения, использующих при оценке отклонений размеров и формы поверхностей аналитически воспроизводимые по результатам измерений ограниченного числа контрольных точек аналоговые модели аппроксимирующих поверхностей.

Рассмотрение данного подхода к метрологическому моделированию показывает, что при реализации аналогового, аналого-дискретного либо дискретного метода необходимо заранее выбрать вид аппроксимирующей поверхности. Очевидно, что при этом может использоваться некоторая априорная информация о характере технологического процесса обработки поверхностей объектов контроля. При этом соблюдается принцип технологическо-метрологического соответствия, постулированный в монографии [1].

Метрологическое моделирование имеет существенное значение для интерпретации результатов измерений при контроле, что дает возможность отнести объект измерения к одному из двух классов – «годные» и «брак». При этом необходимо учитывать, что интерпретация результатов измерения существенно зависит от параметров и характеристик соответствующей метрологической модели процесса контроля, таких как вид распределения контролируемого параметра, смещение центра группирования относительно середины поля допуска, положение контрольных границ, объем выборки и др.

ГЛАВА 2

РАСЧЕТ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КООРДИНАТНОМ КОНТРОЛЕ ПО КРИТЕРИЮ ДОПУСТИМОГО РИСКА

2.1 Метрологические модели процессов операционного контроля

Метрологические модели процессов операционного контроля предназначены для описания основных свойств и параметров операционного контроля, определяющих допустимую погрешность измерений $[\Delta]$.

С точки зрения моделирования операционного контроля, следующие его особенности, представляются наиболее важными:

- на операционный контроль приходится основная часть контрольных операций в процессе производства;
- к процессам операционного контроля предъявляются жесткие требования по длительности;
- операционный контроль (при его корректной организации) может давать достаточно полную информацию о ходе технологического процесса.

Преобладание объемов операционного контроля над другими видами контроля в производственном процессе очевидно, поскольку данный вид контроля в общем случае может применяться после каждого технологического перехода. В отличие от приёмочного контроля, операционный контроль может распространяться на промежуточные параметры, не остающиеся на готовом изделии.

Обеспечение информационной полноты заключается в том, что в ходе операционного контроля генерируется массив измерительной информации, состоящий из результатов измерения ряда параметров объектов контроля и отражающий их изменения во времени. Такая информация традиционно используется для проверки соответствия объектов контроля установленным требованиям, то есть для проведения так называемой «разбраковки». Вместе с тем, эта информация может быть использована

и для контроля состояния технологического процесса по косвенным признакам. В частности, такой подход нашел широкое применение в статистическом управлении процессами, в рамках которого результаты измерения параметров объектов, взятых при мгновенной выборке, используются для идентификации и устранения особых причин изменчивости процессов, что является залогом «стабильного воспроизводства качества продукции» [23].

Ограничение длительности операционного контроля обусловлено тем обстоятельством, что контрольные операции, как и все вспомогательные операции, в случае массового и крупносерийного поточного производства определяют такт поточной линии. Поэтому длительность контрольных операций строго регламентируется стандартом-планом поточной линии. Те же рассуждения справедливы по отношению к пространственной закреплённости операционного контроля, поскольку расположение рабочих мест при поточной форме организации производства является неизменным.

Путем анализа результатов измерений, производимых в ходе операционного контроля, можно дать оценку стабильности технологического процесса посредством расчета соответствующих индексов.

Отношение допуска контролируемого параметра к оценке рассеяния (полной изменчивости) процесса, называемое индексом пригодности процесса P_p , позволяет оценить вероятность получения детали, не соответствующей установленным требованиям (брака) в результате реализации определенного технологического процесса либо технологической операции [24]. В качестве меры рассеяния используют k средних квадратических отклонений $\sigma_{\text{тех}}$ контролируемого параметра. Обычно при расчете статистических показателей возможностей процесса принимают допущение, что показатель качества процесса распределен по нормальному закону распределения, и для вероятности $P = 99,73 \%$ коэффициент k принимают равным 6. В этом случае индекс пригодности рассчитывается по формуле:

$$P_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{\text{тех}}} \quad (2.1)$$

где USL и LSL – верхняя и нижняя границы поля допуска, $\sigma_{\text{тех}}$ – СКО контролируемого параметра.

Если оценка рассеяния контролируемого параметра больше его допуска, то есть $P_p < 1$, можно утверждать, что процент несоответствующих требованиям единиц деталей составит больше, чем 0,27 %. Такое значение вероятности появления бракованной детали является достаточно большим, поэтому в целях обеспечения выпуска продукции надлежащего качества целесообразно производить сплошной контроль деталей. В отдельных случаях применение выборочного контроля деталей может оказаться экономически оправданным, однако для построения метрологической модели процесса контроля выбор сплошной либо выборочной формы не играет определяющей роли.

В случае, если рассеяние контролируемого параметра меньше его допуска, то есть $P_p > 1$, можно утверждать, что процент несоответствующих требованиям единиц деталей составит меньше, чем 0,27 %. При значении $P_p > 1,33$ процент несоответствующих деталей составит 0,0066 %, и при таком соотношении допуска к рассеянию контролируемого параметра целесообразно переходить от контроля деталей к контролю состояния производственного процесса. При попадании значения индекса пригодности процесса P_p в диапазон (1; 1,33) решение о выборе формы организации контроля принимается исходя из соображений экономической целесообразности.

Так как объем контроля варьируется в зависимости от стабильности технологического процесса, можно предложить принцип полноты охвата операционным контролем, который будет основополагающим для метрологического моделирования соответствующих процессов контроля [25]. Для обеспечения полноты охвата контролем постулируем наличие двух различных групп контрольных задач. Одна из них должна обеспечить получение информации об объекте обработки, а вторая – о качестве технологического процесса.

Первая группа задач связана с нахождением действительного значения контролируемого параметра с целью отнесения объекта по результатам контроля к годным либо бракованным. В данном случае результатом контроля является так называемая «разбраковка».

К задачам первой группы можно отнести:

- контроль «готового» параметра после последнего технологического перехода (фактический аналог приемочного контроля соответствующего параметра объекта);
- контроль «промежуточного» параметра (аналог приемочного контроля параметра объекта до его окончательной обработки).

Вторая группа задач направлена на определение действительных значений некоторого геометрического параметра деталей и последующую обработку полученных результатов по определенному алгоритму с целью оценки состояния технологического процесса. Назначением данной группы задач является мониторинг технологического процесса.

К задачам второй группы можно отнести:

- исследование точности технологического процесса по результатам измерений получаемых параметров на управляемых выборках объектов;
- контроль состояния технологического оборудования по результатам получения соответствующего параметра на управляемой выборке объектов.

Очевидно, что для каждой из этих групп задач необходимо разрабатывать соответствующую метрологическую модель. В связи с этим метрологические модели процессов контроля можно разделить на модели контроля продукции и модели контроля состояния технологического процесса.

Основной целью построения метрологической модели процесса операционного контроля применительно к контролю деталей («разбраковке») является нормирование допустимой погрешности измерения исходя из требований к обеспечению достоверности контроля.

В зависимости от состояния и конструкции СИ, условий и методики выполнения измерений, погрешность измерения про-

является в виде случайной величины, распределенной по некоторому закону и имеющей определенные количественные оценки. Действительные значения геометрических параметров деталей, полученные в ходе операционного контроля, также проявляют себя случайным образом. Сочетание погрешности измерения и истинного значения измеряемого параметра является случайной величиной, имеющей композиционный закон распределения. Следовательно, оценки параметров контроля, в том числе результата контроля, а также рисков изготовителя и потребителя могут быть найдены только вероятностным путем.

Рассмотрим особенности распределения погрешности измерения как случайной величины.

Традиционно распределение погрешности измерения считают соответствующим нормальному закону, хотя строгого математического обоснования для этого не существует. В качестве аргументов в пользу применения нормального закона распределения принимают следующие свойства нормального распределения:

- положительные и отрицательные значения погрешности, равные по абсолютной величине, равновероятны;
- чем больше значение погрешности, тем меньше вероятность такого значения;
- с увеличением числа измерений одной и той же величины среднее арифметическое значение случайных погрешностей стремится к нулю.

С целью недопущения выпуска продукции ненадлежащего качества в случае отсутствия достаточной априорной информации, прибегают к допущению о равновероятном распределении погрешности измерения. Данный вариант распределения с точки зрения метрологии является «наихудшим», а его применение позволит в частности дать предельные оценки рисков изготовителя и потребителя продукции.

Особенности распределения контролируемого параметра также важно учитывать при построении метрологических моделей процессов операционного контроля. Специфика, связанная с реализацией различных технологических процессов, приводит к необходимости учета множества влияющих факторов, что ска-

зывается на характере распределения значений контролируемого параметра. Для практического применения (например, для получения оценок рисков изготовителя и заказчика), можно использовать законы нормального, треугольного, трапецеидально-го и равновероятного распределений [26-28].

Для построения метрологической модели контроля продукции воспользуемся следующими допущениями [29]:

- контролируемый параметр производственного процесса имеет нормальное распределение со следующими параметрами μ_0, σ_T ;

- математическое ожидание контролируемого параметра совпадает с серединой поля допуска $\mu_0 = \frac{IT}{2}$;

- технологическое поле рассеяния контролируемого параметра $D = 6\sigma_T$;

- допуск контролируемого параметра (IT) меньше технологического поля рассеяния, то есть $IT < D$;

- приемочные границы (CR) в общем случае совпадают с границами поля допуска (верхней USL и нижней LSL). В модели должна быть предусмотрена возможность смещения приемочных границ;

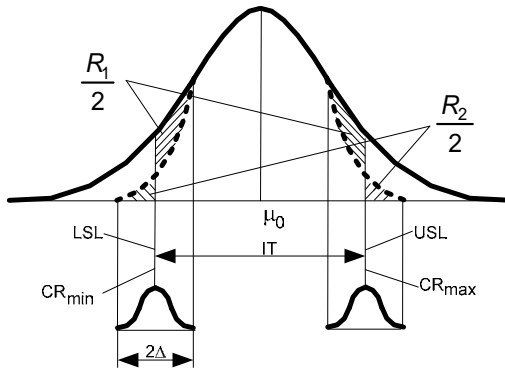
- погрешность измерения распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением $\sigma_{изм}$ либо по равновероятному закону.

Графическая интерпретация рассматриваемой метрологической модели (при нормальном распределении контролируемого параметра и погрешности измерения) представлена на рис. 2.1.

В рамках рассматриваемой метрологической модели изделие признается годным по контролируемому параметру, если выполняется условие:

$$LSL \leq X \leq USL, \text{ при } i = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

где n - общее количество изделий.



USL, LSL – предельные значения контролируемого параметра (верхнее и нижнее соответственно); IT – допуск контролируемого параметра; CR_{min}, CR_{max} – приемочные границы; μ_0 – математическое ожидание контролируемого параметра; R_1 – риск первого рода; R_2 – риск второго рода; Δ – погрешность измерения.

Рисунок 2.1 – Графическая интерпретация метрологической модели операционного контроля применительно к контролю продукции

Из-за наличия погрешности измерений Δ_{Σ} , которая при измерительном контроле носит случайный характер, мы оперируем оценками контролируемого параметра $X_i^* = X_i + \Delta_{\Sigma_i}$. Решение о годности изделия по контролируемому параметру принимается, если выполняется неравенство:

$$LSL \leq X^* \leq USL, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

Если известны плотность вероятностей $f(X)$ контролируемого параметра X и плотность вероятностей погрешности измерения $f(\Delta)$, то при независимости этих законов и заданных допустимых верхним и нижним значениях параметра вероятность принятия годной детали определяется по известной формуле:

$$P_1 = \int_{LSL}^{USL} f(X) \left[\int_{LSL-X}^{USL-X} f(\Delta) d\Delta \right] dX. \quad (2.4)$$

Если неравенство (2.3) не выполняется, изделие признается несоответствующим требованиям (негодным) и бракуется.

Вероятность такого исхода описывается выражением:

$$P_2 = \int_{-\infty}^{LSL-X} f(X) \left[\int_{-\infty}^{USL-X} f(\Delta) d\Delta \right] dX + \int_{USL-X}^{\infty} f(X) \left[\int_{-\infty}^{LSL-X} f(\Delta) d\Delta + \int_{USL-X}^{\infty} f(\Delta) d\Delta \right] dX. \quad (2.5)$$

Если неравенство (2.2) выполняется, а неравенство (2.3) не выполняется, то имеет место ошибка контроля первого рода (годное изделие будет забраковано). Вероятность такой ошибки обозначим P_I . С другой стороны, если неравенство (2.2) для некоторой детали не выполняется, а (2.3) выполняется, то имеет место ошибка контроля второго рода (фактически негодное изделие будет признано годным). Вероятность ошибки второго рода обозначим P_{II} .

Выражения для P_I и P_{II} имеют следующий вид:

$$P_I = \int_{LSL}^{USL} f(X) \left[\int_{-\infty}^{LSL-X} f(\Delta) d\Delta \right] dX + \int_{LSL}^{USL} f(X) \left[\int_{USL-X}^{\infty} f(\Delta) d\Delta \right] dX, \quad (2.6)$$

$$P_{II} = \int_{-\infty}^{LSL} f(X) \left[\int_{LSL-X}^{USL-X} f(\Delta) d\Delta \right] dX + \int_{USL}^{\infty} f(X) \left[\int_{LSL-X}^{USL-X} f(\Delta) d\Delta \right] dX. \quad (2.7)$$

Таким образом, контроль сопряжен с двумя видами рисков: R_I - это вероятность, характеризующая среднюю долю фактически годных, но ошибочно забракованных при контроле изделий от общего числа забракованных в результате контроля изделий, то есть

$$R_1 = \frac{P_I}{P_1 + P_2} \quad (2.8)$$

Используя терминологию, принятую в статистическом управлении технологическими процессами такой вид рисков будем именовать риском первого рода. Тогда под риском второго рода R_2 будем понимать вероятность, характеризующую среднюю долю фактически негодных, но ошибочно признанных годными в результате контроля изделий среди всех принятых.

$$R_2 = \frac{P_{II}}{P_{II} + P_I} \quad (2.9)$$

Данные параметры (R_1 , R_2) могут быть использованы при экономических расчетах возможных потерь из-за производства продукции ненадлежащего качества и в значительной степени зависят от значения погрешности измерения Δ . Параметры P_I , P_{II} , R_1 , R_2 используются при определении достоверности контроля.

Необходимо отметить, что полученная модель нашла достаточно широкое применение в технической диагностике, статистическом анализе финансовых рисков и ряде других областей. Уточнение данной модели в соответствии с реальными производственными условиями является предпосылкой для создания адекватных метрологических моделей процессов операционного контроля.

Можно выделить два подхода к определению достоверности контроля. Первый подход заключается в том, что достоверность D контроля определяется как вероятность принятия правильного решения при контроле, то есть правильного отнесения объекта контроля к одному из двух классов: «годные» или «бракованные». Другими словами,

$$D = 1 - P_I - P_{II} \quad (2.10)$$

При оценке достоверности по формуле (2.10) риски первого и второго рода уравниваются в значимости. В то же время в большинстве случаев принято считать более критическим риск второго рода, связанный с выпуском и передачей заказчику (либо передачей на следующую технологическую операцию) изделия (детали), не соответствующей установленным требованиям. И если риск первого рода сопряжен с определенными экономическими потерями производителя, то риск второго рода может привести к гораздо более существенным экономическим потерям, а также к рядом других негативных экономических и социальных эффектов. Поэтому в качестве меры достоверности контроля в отдельных случаях можно рассматривать только риск заказчика.

Второй подход к определению достоверности основан на рассмотрении принципиальных различий контроля физических величин, воспроизводимых на объекте измерения один раз и бесконечное множество раз. Элементарный анализ показывает, что физическая величина может воспроизводиться на объекте однократно (масса, объём и др.) или бесконечное число раз (толщина объекта или площадь сечения), причём в последнем случае имеют дело с множеством номинально одинаковых, но фактически различающихся физических величин. При контроле физических величин, реализуемых на объекте бесконечное множество раз, достоверность результата во многом определяется адекватностью создаваемой метрологической модели объекта контроля. Подробный анализ влияния адекватности метрологической модели объекта контроля на достоверность контроля приведен в главе 3.

При реализации первого подхода к оценке достоверности контроля сформулированная выше цель моделирования может быть конкретизирована следующим образом: нахождение значения допустимой погрешности измерения при фиксированном допустимом значении риска второго рода.

Метрологическая модель процесса операционного контроля применительно к контролю состояния производственного процесса строится со следующей целью: нормирование допустимой погрешности измерения исходя из требований к точности определения параметров, характеризующих состояние производственного процесса. К таким параметрам можно отнести меры положения и рассеяния контролируемого параметра.

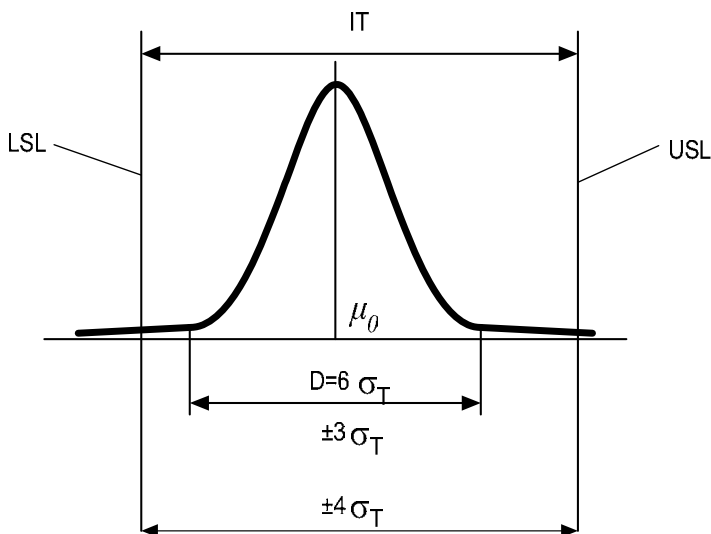
При построении данной модели целесообразно исходить из следующих допущений:

- контролируемый параметр технологического процесса имеет нормальное распределение со следующими параметрами μ_0, σ_T ;

- математическое ожидание контролируемого параметра в общем случае не совпадает с серединой поля допуска $\mu_0 \neq \frac{IT}{2}$;

- технологическое поле рассеяния контролируемого параметра $D=6\sigma_T$, причем данный параметр подлежит определению;
- допуск контролируемого параметра (IT) не совпадает с технологическим полем рассеяния, и в общем случае $IT > 6\sigma_T$.
- приемочные границы не задаются.

Графическая интерпретация рассматриваемой метрологической модели представлена на рис. 2.2.



USL, LSL – предельные значения контролируемого параметра (верхнее и нижнее соответственно); IT – допуск контролируемого параметра;
 D – практическое поле рассеяния контролируемого параметра;
 μ_0 – математическое ожидание контролируемого параметра.

Рисунок 2.2 – Графическая интерпретация метрологической модели операционного контроля применительно к контролю состояния технологического процесса

Таким образом, метрологические модели процессов операционного контроля можно классифицировать по следующим признакам:

- объект контроля;
- комбинация законов распределения контролируемого параметра и погрешности измерения;
- наличие/отсутствие возможности сдвига приемочных (контрольных) границ.

Классификация метрологических моделей процессов операционного контроля приведена на рис. 2.3.

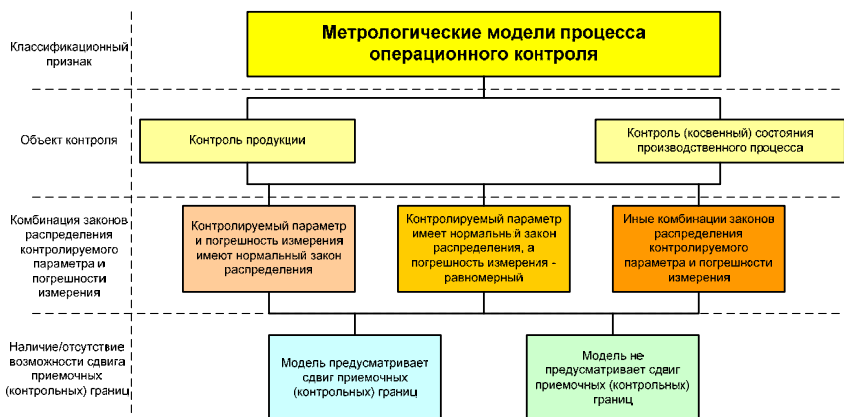


Рисунок 2.3 – Классификация метрологических моделей процессов операционного контроля

2.2 Метрологическая модель операционного контроля применительно к контролю продукции при нормальном распределении контролируемого параметра и погрешности измерения

В качестве аналитического описания метрологической модели сплошного контроля деталей будем рассматривать двумерную случайную величину (x, y) , где x – истинное значение измеряемой физической величины, y – результат измерения [30-31]. Двумерная плотность вероятности записывается в следующем виде:

$$f(x, y) = f(x)x(y | x) \quad (2.11)$$

Считаем, что истинное значение измеряемой величины и результат измерения распределены по нормальному закону. Обозначим СКО истинного значения измеряемой величины $\sigma_{\text{тех}}$, а СКО погрешности измерения – $\sigma_{\text{изм}}$. В дальнейшем для упрощения расчетов примем $\sigma_{\text{тех}} = 1$.

Тогда плотности вероятности $f(x)$ и $f(y|x)$ определяются следующими выражениями:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{тех}}^2}} e^{\frac{-(x)^2}{2\sigma_{\text{тех}}^2}} \quad (2.12)$$

$$f(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{изм}}^2}} e^{\frac{-y(-x)^2}{2\sigma_{\text{изм}}^2}} \quad (2.13)$$

Рассмотрим область допустимых значений переменных y и x и соответствующие этим значениям события. В рассматриваемом случае возможными являются следующие события:

- истинное значение измеряемой величины находится в поле допуска, результат измерения находится в приемочном поле, то есть $x \in IT = [LSL, USL]$, $y \in [CR_{\min}, CR_{\max}]$. (событие A). Наступление данного события означает что годная деталь принята. Вероятность данного события обозначим $P(A)$;

- истинное значение измеряемой величины находится вне поля допуска, результат измерения находится в приемочном поле, то есть $x \in]-\infty, LSL] \cup [USL, +\infty[$, $y \in [CR_{\min}, CR_{\max}]$. (событие B). Наступление данного события означает, что фактически негодная (бракованная) деталь принята. Вероятность данного события обозначим $P(B)$. Отметим, что данная вероятность соответствует т.н. риску заказчика;

- истинное значение измеряемой величины находится в поле допуска, а результат измерения находится вне приемочного по-

ля, то есть $x \in IT = [LSL, USL]$, $y \in]-\infty, CR_{\min}] \cup [CR_{\max}, +\infty[$. (событие C). Наступление данного события означает, что фактически годная деталь не принята. Вероятность данного события обозначим $P(C)$. Отметим, что данная вероятность соответствует т.н. риску производителя;

- истинное значение измеряемой величины находится вне поля допуска, результат измерения находится вне приемочного поля, т.е. $x \in]-\infty, LSL] \cup [USL, +\infty[$, $y \in]-\infty, CR_{\min}] \cup [CR_{\max}, +\infty[$ (событие D). Наступление данного события означает что негодная (бракованная) деталь не принята. Вероятность данного события обозначим $P(D)$.

Область допустимых значений переменных и соответствующие этим значениям события графически представлены на рис. 2.4.

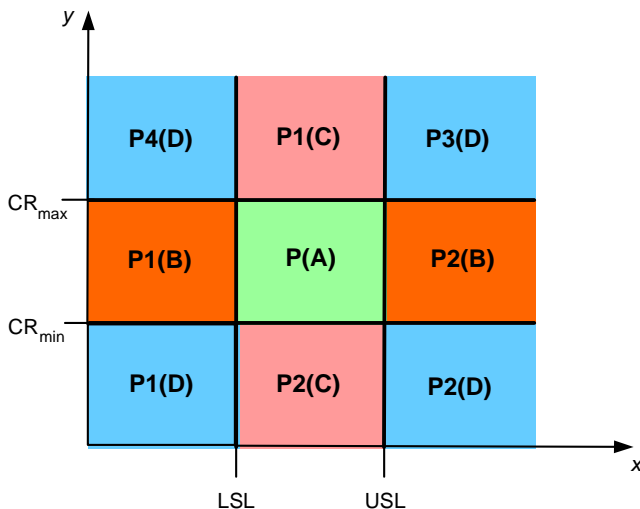


Рисунок 2.4 – Область допустимых значений переменных и соответствующие этим значениям события

Очевидно, что вероятности наступления событий B и C складываются из двух составляющих, а вероятность наступления

события D – из четырех. Запишем выражения для этих вероятностей.

Вероятность события A (приемка годного изделия) определяется по формуле

$$P(A) = \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} dy \int_{LSL}^{USL} f(x, y) dx \quad (2.14)$$

Вероятность события B (принятие бракованного изделия) определяется по формуле

$$P(B) = \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} dy \int_{-\infty}^{LSL} f(x, y) dx + \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} dy \int_{USL}^{+\infty} f(x, y) dx \quad (2.15)$$

Вероятность события C (не принятие годного изделия) определяется по формуле

$$P(C) = \int_{CR_{-\infty}}^{CR_{\min}} dy \int_{LSL}^{USL} f(x, y) dx + \int_{CR_{\max}}^{+\infty} dy \int_{LSL}^{USL} f(x, y) dx \quad (2.16)$$

Вероятность события D (не принятие бракованного изделия) определяется по формуле

$$P(D) = \int_{-\infty}^{CR_{\min}} dy \int_{-\infty}^{LSL} f(x, y) dx + \int_{-\infty}^{CR_{\min}} dy \int_{USL}^{+\infty} f(x, y) dx + \int_{CR_{\max}}^{+\infty} dy \int_{USL}^{+\infty} f(x, y) dx + \int_{CR_{\max}}^{+\infty} dy \int_{-\infty}^{LSL} f(x, y) dx. \quad (2.17)$$

Непосредственный расчет вероятностей по формулам (2.15 – 2.16) может быть затруднительным и неточным в связи с применением алгоритмов численного интегрирования. В связи с этим введем упрощения. Очевидно, что вероятность события $(A+B)$ будет равна

$$P(A + B) = \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} dy \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx = \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} f_y(y) dy \quad (2.18)$$

где $f_y(y)$ – маргинальная плотность компоненты y двумерной случайной величины (x, y) , определяемая по формуле

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} e^{\frac{-y^2}{2(1+d^2)}}, \quad (2.19)$$

где величина d – это отношение $\frac{\sigma_{\text{изм}}}{\sigma_{\text{тех}}}$.

Интеграл (2.18) можно вычислить и, при условии, что $CR_{\text{max}} = -CR_{\text{min}} = c$, он равен

$$\int_{-c}^c f_y dy = \text{erf} \left\{ \frac{c}{\sqrt{2(1+d^2)}} \right\}. \quad (2.20)$$

Отсюда можно определить вероятность $P(B)$

$$P(B) = \text{erf} \left\{ \frac{c}{\sqrt{2(1+d^2)}} \right\} - P(A). \quad (2.21)$$

Аналогичным образом

$$\begin{aligned} P(A+C) &= \int_{LCL}^{UCL} dx \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy = \int_{LCL}^{UCL} f(x) dx = \\ &= \int_{LCL}^{UCL} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{тех}}}} e^{\frac{-(x)^2}{\sigma_{\text{тех}}^2}}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Последний интеграл при условии, что $USL = -LSL = g$, может быть вычислен

$$\int_{LCL}^{UCL} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{тех}}}} e^{\frac{-(x)^2}{\sigma_{\text{тех}}^2}} = \text{erf} \left\{ \frac{g}{\sqrt{2}} \right\}. \quad (2.23)$$

Аналогично (3.11) определяем $P(C)$

$$P(C) \text{erf} \left\{ \frac{g}{\sqrt{2}} \right\} - P(A). \quad (2.24)$$

Для упрощения расчетов вероятность $P(D)$ определяем следующим образом:

$$P(C) = 1 - P(A) - P(B) - P(D) \quad (2.25)$$

Индекс пригодности процесса $P_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{\text{тех}}} = \frac{2g}{6\sigma_{\text{тех}}}$ можно

легко учесть в формулах (2.23-2.25). Произведем расчеты при значениях $P_p = 0,9 \dots 1,1$ и $d = 0,1 \dots 1,0$; $c = g$ [32]. Результаты моделирования представлены на рис. 2.5-2.8.

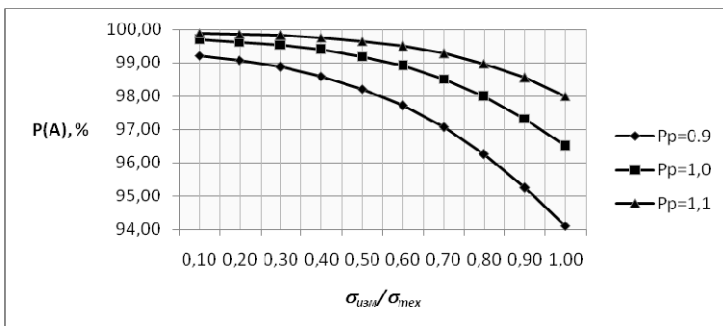


Рисунок 2.5 – Зависимость вероятности правильной приемки продукции от соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}}$ при различных значениях P_p .

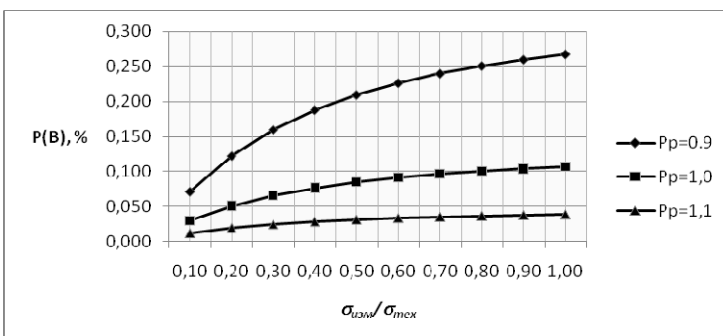


Рисунок 2.6 – Зависимость вероятности неправильной приемки продукции от соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}}$ при различных значениях P_p .

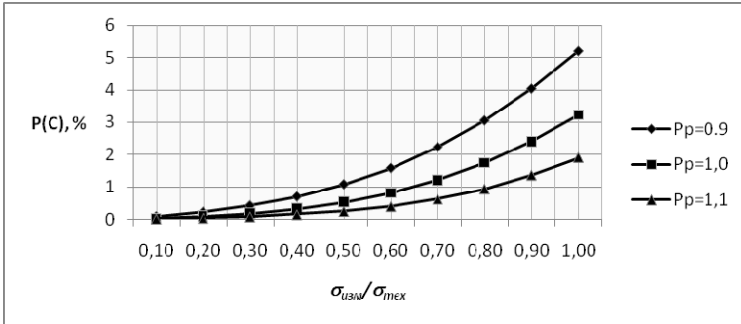


Рисунок 2.7 – Зависимость вероятности неправильной отбраковки продукции от соотношения $\sigma_{изм}/\sigma_{тех}$ при различных значениях P_p .

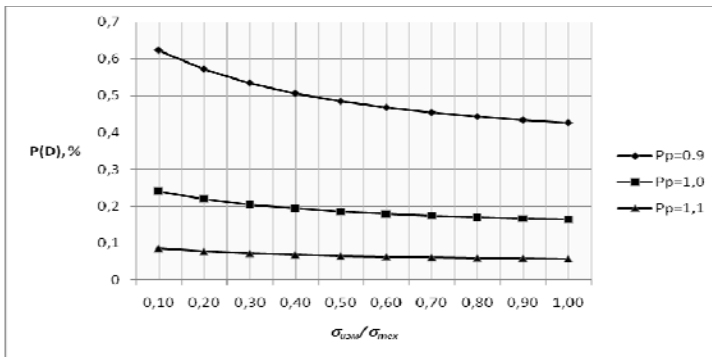


Рисунок 2.8 – Зависимость вероятности правильной отбраковки продукции от соотношения $\sigma_{изм}/\sigma_{тех}$ при различных значениях P_p .

Анализ результатов моделирования (графики на рис. 2.5 – 2.8) позволяет сделать следующие выводы:

- вероятности неправильного приема и забракования продукции монотонно возрастают с возрастанием значения соотношения $\sigma_{изм}/\sigma_{тех}$, а вероятности правильного приема и забракования – монотонно убывают;

- в случае, если производственный процесс обладает высокой стабильностью, то есть индекс пригодности P_p для него превышает единицу, вероятность неправильной приемки

продукции не превышает 0,1 % во всем диапазоне значений соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}}$. Для менее стабильных технологических процессов вероятность неправильной приемки составляет около 0,21 % при $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}} = 0,5$ и 0,27 % при $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}} = 1,0$. Очевидно, что изменение индекса пригодности процесса приводит к изменению вероятности неправильного принятия продукции в 2,5 – 3 раза;

– вероятность неправильного забракования продукции исчисляется единицами процентов для всех значений соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}}$ при всех исследуемых значениях P_p . изменение индекса пригодности процесса не приводит к существенному изменению вероятности неправильного забракования продукции;

– вероятности неправильного принятия и забракования продукции, рассчитанные при помощи рассматриваемой метрологической модели, существенно меньше соответствующих предельных вероятностей, на основе которых разработаны рекомендации по нормированию погрешности, положенные в основу ГОСТ 8.051 и РД 50-98-86.

Последний вывод подтверждает целесообразность применения адаптивного подхода к нормированию точности измерений при операционном контроле применительно к контролю продукции. Указания по нормированию допустимой погрешности измерений, приведенные в ГОСТ 8.051, являются чрезмерно строгими для процессов, характеризующихся относительно высокой стабильностью (с индексом пригодности P_p 0,9 и выше). Например, предельные значения вероятностей неправильного приема и забракования продукции по ГОСТ 8.051 для соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}} = 0,2$ равны соответственно 2,0 % и 2,8 %, в то время как проведенные расчеты показывают, что при значении $P_p = 0,9$ они равны соответственно 0,12 % и 0,43 %. Даже при значении $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}} = 1,0$ (то есть погрешность измерения равна допуску на контролируемый параметр), значения вероятностей неправильного приема и забракования продукции меньше

рассматриваемых предельных вероятностей (2,0 % и 2,8 %). Для более стабильных процессов эти значения еще меньше. Этот анализ позволяет сделать вывод о возможности оптимизации точности измерений по критерию их экономичности, поскольку для достаточно стабильных процессов без ущерба достоверности контроля можно применять более простые СИ с большей инструментальной погрешностью. Экономический эффект от такой оптимизации может быть достаточно существенным, поскольку разница в стоимости средств линейных измерений, погрешности которых различаются в 2-3 раза, может составлять до 200 % (например, различие в стоимости микрометра и многооборотной измерительной головки).

Несмотря на то, что использование полученных результатов моделирования позволяет в ряде случаев оптимизировать требования точности измерений в сторону уменьшения, даже такая точность может оказаться практически нереализуемой по техническим или экономическим соображениям. В этом случае возникает необходимость поиска других путей обеспечения предъявляемых к контролю требований.

Одним из возможных вариантов решения этой задачи является введение приемочных границ, отличающихся от нормативных, то есть $CR_{\max} \neq USL$, $CR_{\min} \neq LSL$, или, переходя к обозначениям, принятым в формулах (2.20-2.24), $c \neq g$.

В условиях реального производства более предпочтительным является учет требований потребителя продукции, чем учет требований к контролю со стороны изготовителя. Поэтому очевидно, что изменение положения приемочных границ должно быть таким, чтобы уменьшить риск заказчика, несмотря на возможное увеличение риска изготовителя. Для реализации этого требования приемочные границы должны быть сужены по отношению к допуску.

Рассмотрим влияние сужения контрольных границ на риски первого и второго рода. Для этого произведем моделирование вероятностей неправильного принятия продукции $P(B)$ и ее неправильного забракования $P(C)$ при значениях индекса

пригодности процесса $P_p = 0,9; 1,0; 1,33$ и различных соотношениях ширины приемочных границ и поля допуска g/c : 1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2.9 – 2.14 в виде количества единиц неправильно принятой либо неправильно забракованной продукции на миллион единиц проверенной. Результаты моделирования позволят определить соотношения средних квадратических отклонений погрешности измерения и контролируемого параметра, а также ширины приемочных границ и поля допуска, при которых выполняются требования критического уровня дефектности.

Требования критического уровня дефектности устанавливаются заказчиком в контрактах на поставку партии продукции. В случае операционного контроля в роли заказчика выступает само предприятие-изготовитель продукции. Тогда требования критического уровня дефектности могут формулироваться исходя из допустимых экономических потерь.

При неправильном забраковании полуфабриката после определенной технологической операции предприятие несет экономические потери, которые рассчитываются как сумма затрат на все технологические операции по производству данного полуфабриката.

При неправильной приемке полуфабриката предприятие несет экономические потери, которые могут быть рассчитаны как сумма затрат на все технологические операции по производству данного полуфабриката до момента неправильной приемки и затрат на все технологические операции, которые будут проведены на фактически бракованном полуфабрикate до следующей контрольной операции того же параметра, либо до приемочного контроля качества продукции.

При таком подходе к оценке потерь можно установить допустимые риски неправильного принятия и забракования продукции, а исходя из данных рисков – предельные значения вероятностей неправильной приемки и забракования.

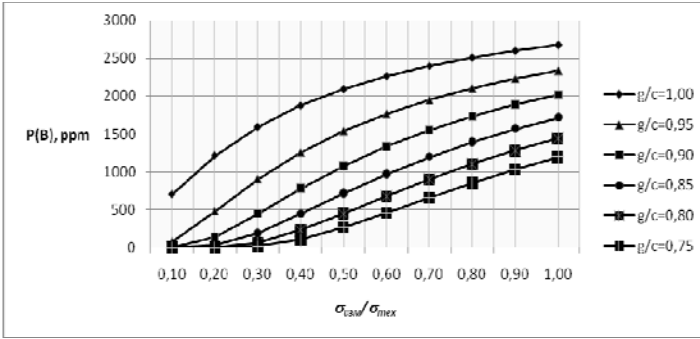


Рисунок 2.9 – Результаты расчета вероятности неправильного принятия продукции $P(B)$, ppm, при значениях $P_p = 0,9$; $g/c = \{1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75\}$

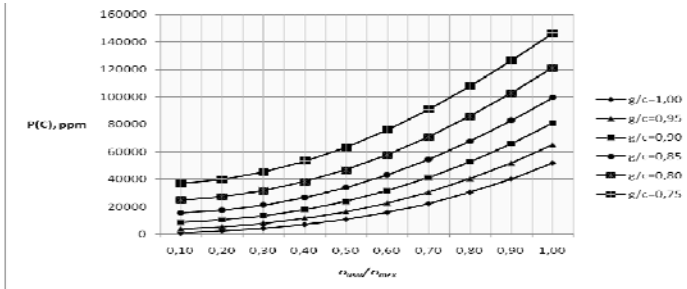


Рисунок 2.10 – Результаты расчета вероятности неправильного забракования продукции $P(C)$, ppm, при значениях $P_p = 0,9$; $g/c = \{1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75\}$

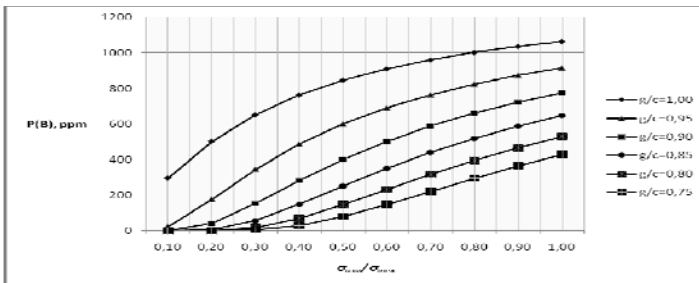


Рисунок 2.11 – Результаты расчета вероятности неправильного принятия продукции $P(B)$, ppm, при значениях $P_p = 1,0$; $g/c = \{1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75\}$

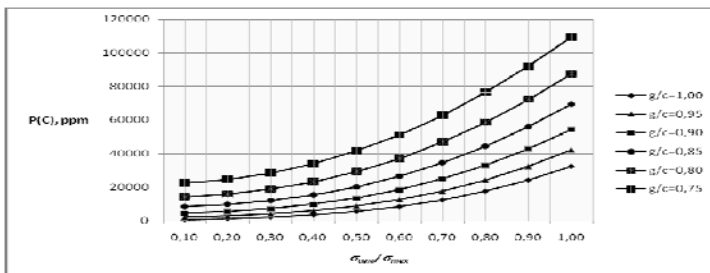


Рисунок 2.12 – Результаты расчета вероятности неправильного забракования продукции $P(C)$, ppm, при значениях $P_p = 1,0$; $g/c = \{1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75\}$

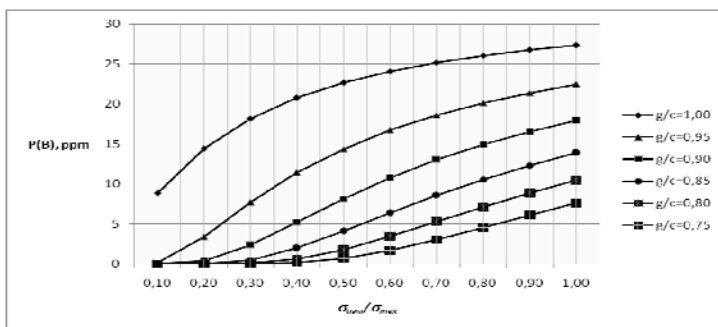


Рисунок 2.13 – Результаты расчета вероятности неправильного принятия продукции $P(B)$, ppm, при значениях $P_p = 1,33$; $g/c = \{1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75\}$

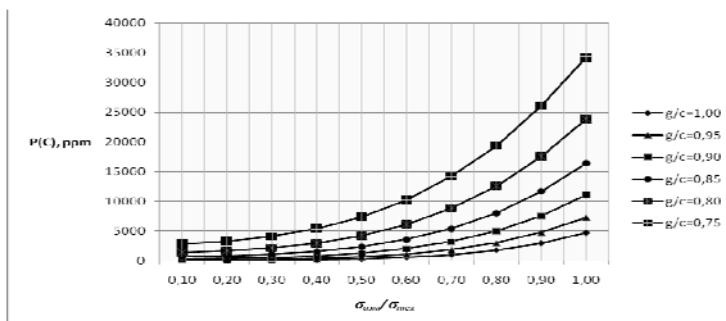


Рисунок 2.14 – Результаты расчета вероятности неправильного забракования продукции $P(C)$, ppm, при значениях $P_p = 1,33$; $g/c = \{1,0; 0,95; 0,90; 0,85; 0,80; 0,75\}$

Анализ результатов моделирования (графики на рис. 2.9 – 2.14) позволяет сделать следующие выводы:

– сужение приемочных границ позволяет существенно снизить вероятность неправильной приемки продукции $P(B)$. Вместе с тем, вероятность неправильного забракования продукции $P(C)$ возрастает, причем непропорционально снижению вероятности $P(B)$;

– рекомендации по выбору параметров производственного процесса и контроля, необходимых для выполнения требований заказчика к уровню дефектности партии продукции, приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Рекомендации по выбору параметров производственного процесса и контроля, необходимых для выполнения требований заказчика к уровню дефектности партии продукции

Требования заказчика к уровню дефектности партии продукции, $P(B)$, ppm	Значения параметров, позволяющие удовлетворить требования заказчика		
	P_p	g/c	$\sigma_{\text{изм}} / \sigma_{\text{тех}}$
1	2	3	4
1-10	0,90	0,80	0,20
	1,00	0,85	0,20
	1,33	1,00	0,10
		0,95	0,30
		0,90	0,50
		0,85	0,70
		0,80	1,00
10-50	0,90	0,75	0,30
		0,85	0,20
	1,00	0,75	0,40
		0,85	0,30
		1,00	1,00
50-100	0,90	0,85	0,20
	1,00	0,75	0,50
		0,80	0,40
		0,85	0,30
		0,90	0,20
	1,33	1,00	1,00
100-500	0,90	0,75	0,60

Окончание таблицы 2.1

1	2	3	4
100-500	1,00	0,80	0,50
		0,85	0,40
		0,90	0,30
		0,95	0,20
		0,75	1,00
		0,80	0,90
	1,33	0,85	0,70
		0,90	0,50
		0,95	0,30
		1,00	0,20
		1,00	1,00

2.3 Метрологическая модель операционного контроля применительно к контролю продукции при нормальном распределении контролируемого параметра и равномерном распределении погрешности измерения

В рассматриваемом случае плотности вероятности $f(x)$ и $f(y/x)$ двумерной случайной величины $P(x, y)$ с плотностью вероятности (2.1) записываются в следующем виде

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{тех}}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma_{\text{тех}}^2}} \quad (2.26)$$

$$f(y|x) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta}, & |y-x| \leq \Delta \\ 0 & |y-x| > \Delta \end{cases} \quad (2.27)$$

где $\Delta = 3\sigma_{\text{изм}}$ – инструментальная погрешность измерения.

Перейдем к новым переменным

$$\tilde{x} = \frac{x-a}{\sigma_{\text{тех}}}, \quad \tilde{y} = \frac{y-a}{\sigma_{\text{тех}}} \quad (2.28)$$

В новых переменных выражения (3.16) и (3.17) примут вид

$$f(\tilde{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (2.29)$$

$$p(\tilde{y} | \tilde{x}) = \begin{cases} \frac{\sigma_{\text{тех}}}{2\Delta}, & |\tilde{y} - \tilde{x}| \leq \frac{\Delta}{2\sigma_{\text{тех}}} \\ 0, & |\tilde{y} - \tilde{x}| > \frac{\Delta}{2\sigma_{\text{тех}}}, \end{cases} \quad (2.30)$$

Маргинальная плотность распределения случайной величины \tilde{y} равна

$$p(\tilde{y}) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tilde{x}) p(\tilde{y} | \tilde{x}) d\tilde{x} \quad (2.31)$$

Так как $p(\tilde{y} | \tilde{x})$ отлично от нуля лишь при $|\tilde{y} - \tilde{x}| \leq \frac{\Delta}{2\sigma_{\text{тех}}}$, то интеграл (3.21) сведется к выражению

$$\frac{\sigma_{\text{тех}}}{2\Delta} \int_{-\infty}^{\infty} d\tilde{x} p(\tilde{x}) p(\tilde{y} | \tilde{x}) = \frac{\sigma_{\text{тех}}}{4\Delta} \left[\text{erf} \left(\frac{\tilde{y} + \Delta}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) + \text{erf} \left(\frac{\Delta - \tilde{y}}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) \right]. \quad (2.32)$$

Обозначим границы поля допуска и приемочные границы в новых переменных

$$\tilde{x}_{\text{H}} = \frac{LSL}{\sigma_{\text{тех}}}, \quad \tilde{x}_{\text{B}} = \frac{USL - a}{\sigma_{\text{тех}}}, \quad (2.33)$$

$$\tilde{C}_{\text{H}} = \frac{CR_{\text{min}} - a}{\sigma_{\text{тех}}}, \quad \tilde{C}_{\text{B}} = \frac{CR_{\text{max}} - a}{\sigma_{\text{тех}}}. \quad (2.34)$$

Тогда вероятность события A может быть записана в следующем виде

$$p(A) = \int_{\tilde{x}_{\text{H}}}^{\tilde{x}_{\text{B}}} d\tilde{x} = \int_{\tilde{x}_{\text{H}}}^{\tilde{x}_{\text{B}}} d\tilde{y} p(\tilde{x}, \tilde{y}). \quad (2.35)$$

Отобразим графически области, где $p(\tilde{y}, \tilde{x})$ не равна нулю (рис. 2.15). Очевидно, что вид выражения для вероятности $P(A)$

зависит от расположения приемочных границ, обозначаемых в новых переменных \tilde{G}_H и \tilde{G}_B . Приемочные границы могут совпадать с границами поля допуска (в новых переменных \tilde{x}_H и \tilde{x}_B), либо быть меньше приемочных границ. При смещении приемочных границ происходит уменьшение вероятности неправильной приемки продукции и одновременное увеличение вероятности неправильного забракования. При этом вероятность неправильной приемки может вырождаться (рис. 2.15, б).

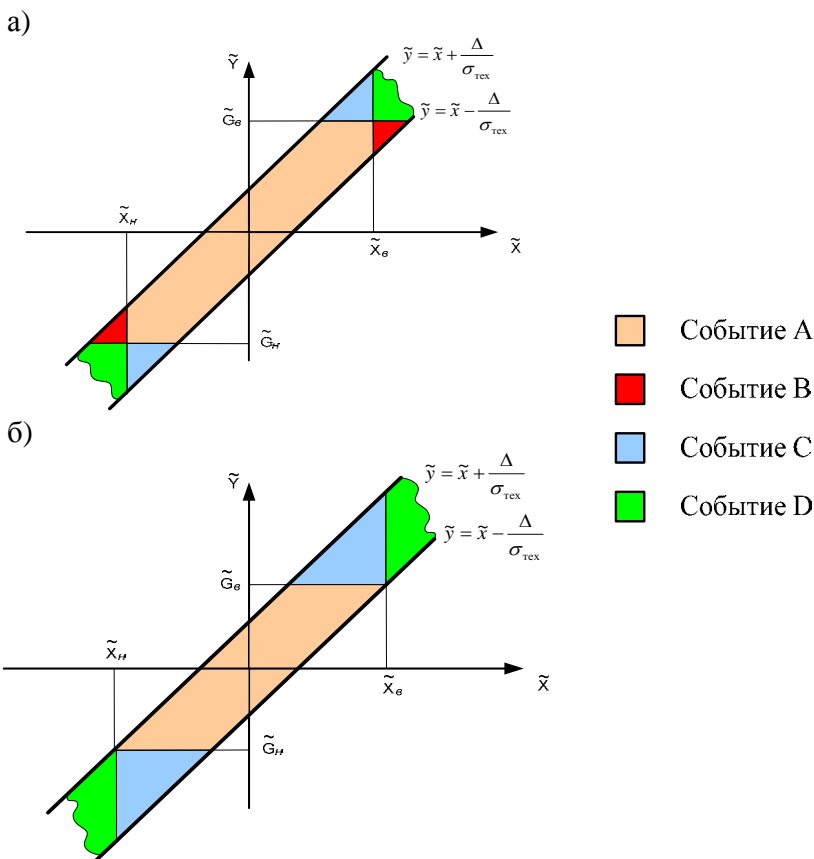


Рисунок 2.15 – Области допустимых значений переменных и соответствующие этим значениям события

В случае, если приемочные границы совпадают с границами поля допуска либо незначительно смещены (рис. 2.15, а), выражение для вероятности $P(A)$ принимает вид:

$$\begin{aligned}
 p(A) = & \int_{\tilde{x}_H - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}}^{\tilde{x}_H} d\tilde{y} \int_{\tilde{y} - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}}^{\tilde{y} + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} d\tilde{x} p(x, y) + \\
 & + \int_{\tilde{C}_H}^{\tilde{x}_H + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} d\tilde{y} \int_{\tilde{x}_H}^{\tilde{y} + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} d\tilde{x} p(x, y) + \\
 & + \int_{\tilde{x}_B - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}}^{\tilde{C}_B + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} d\tilde{y} \int_{\tilde{y} - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}}^{\tilde{x}_B + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} d\tilde{x} p(x, y)
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

По аналогии с подходом, принятым в метрологической модели операционного контроля применительно к контролю продукции при нормальном распределении контролируемого параметра и погрешности измерения, рассмотрим выражения для вероятностей событий $(A+B)$.

$$\begin{aligned}
 P(A+B) = & \int_{\tilde{C}_H}^{\tilde{C}_B} d\tilde{y} \int_{\tilde{y} - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}}^{\tilde{y} + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} d\tilde{x} p(x, y) = \\
 = & \int_{\tilde{C}_H}^{\tilde{C}_B} d\tilde{y} \frac{\sigma_{\text{tex}}}{4\Delta} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\tilde{y} + \Delta}{\sigma_{\text{tex}} \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta - \tilde{y}}{\sigma_{\text{tex}} \sqrt{2}} \right) \right].
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Отсюда можно определить вероятность $P(B)$:

$$P(B) = P(A+B) - P(A) \tag{2.38}$$

Выражение для определения вероятности $P(C)$ имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P(C) = & \frac{\sigma_{\text{tex}}}{\sqrt{2}} \left[\int_{\tilde{x}_H - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}}^{\tilde{C}_H} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\tilde{y} + \Delta}{\sigma_{\text{tex}} \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\tilde{x}_H}{\sigma_{\text{tex}} \sqrt{2}} \right) \right) + \right. \\
 & \left. + \int_{\tilde{C}_B}^{\tilde{x}_B + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{tex}}}} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{\tilde{x}_B}{\sigma_{\text{tex}} \sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta - \tilde{y}}{\sigma_{\text{tex}} \sqrt{2}} \right) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

Отсюда найдем вероятность $P(D)$:

$$P(D) = 1 - P(A) - P(B) - P(C). \quad (2.40)$$

В случае если приемочные границы существенно смещены по отношению к границам поля допуска, и вероятности неправильной приемки продукции вырождается (рис. 2.15, б), выражение для вероятности $P(A)$ принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} P(A) &= \int_{\tilde{C}_H}^{\tilde{C}_B} d\tilde{y} \int_{\tilde{y}-\Delta}^{\tilde{y}+\Delta} P(x, y) d\tilde{x} = \\ &= \frac{\sigma_{\text{тех}}}{\sqrt{2}} \int_{\tilde{C}_H}^{\tilde{C}_B} d\tilde{y} \left[\text{erf} \left(\frac{\tilde{y} + \Delta}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) + \text{erf} \left(\frac{\Delta - \tilde{y}}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Значение вероятности $P(C)$ определяется выражением:

$$\begin{aligned} P(C) &= \int_{\tilde{C}_H}^{\tilde{x}_B + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{тех}}}} d\tilde{y} \int_{\tilde{y} - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{тех}}}}^{\tilde{x}_B} P(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} + \\ &+ \int_{\tilde{x}_H - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{тех}}}}^{\tilde{C}_H} d\tilde{y} \int_{\tilde{C}_B}^{\tilde{x}_B + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{тех}}}} P(\tilde{x}, \tilde{y}) d\tilde{x} = \\ &= \frac{\sigma_{\text{тех}}}{\sqrt{2}} \left[\int_{\tilde{C}_B}^{\tilde{x}_H + \frac{\Delta}{\sigma_{\text{тех}}}} dy \left(\text{erf} \left(\frac{\tilde{x}_B}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) + \text{erf} \left(\frac{\Delta - \tilde{y}}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) \right) + \right. \\ &\left. + \int_{\tilde{x}_H - \frac{\Delta}{\sigma_{\text{тех}}}}^{\tilde{C}_H} dy \left(\text{erf} \left(\frac{\tilde{y} + \Delta}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) + \text{erf} \left(\frac{-\tilde{x}_H}{\sigma_{\text{тех}} \sqrt{2}} \right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Вероятность $P(D)$ в этом случае определяется как

$$P(D) = 1 - P(A) - P(C) \quad (2.43)$$

Произведем расчет вероятностей наступления событий $P(A)$, $P(B)$, $P(C)$ и $P(D)$ для исходных данных, использованных для расчета вероятностей в разделе 2.3 (при значениях $P_p = 0,9 \dots 1,1$

и $d = 0,1 \dots 1,0$; $c = g$). На рис. 2.16 – 2.19 приведены графики зависимости разностей вероятностей $\Delta P(A)$, $\Delta P(B)$, $\Delta P(C)$ и $\Delta P(D)$, полученных при нормальном и равномерном распределении погрешности измерения, от соотношения средних квадратических отклонений погрешности измерения и контролируемого параметра.

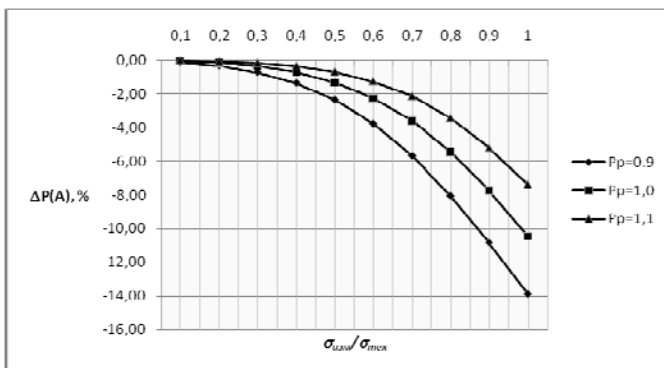


Рисунок 2.16 – Зависимость разности вероятностей правильной приемки продукции при нормальном и равномерном распределении погрешности измерения от соотношения $\sigma_{изм}/\sigma_{тех}$ при различных значениях P_p

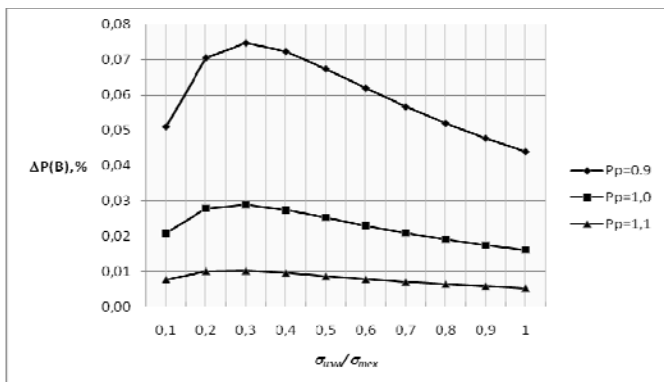


Рисунок 2.17 – Зависимость разности вероятностей неправильной приемки продукции при нормальном и равномерном распределении погрешности измерения от соотношения $\sigma_{изм}/\sigma_{тех}$ при различных значениях P_p

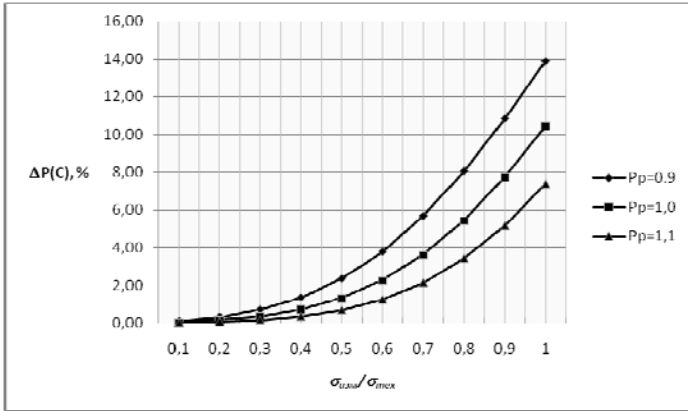


Рисунок 2.18 – Зависимость разности вероятностей неправильной отбраковки продукции при нормальном и равновероятном распределении погрешности измерения от соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}}$ при различных значениях P_p

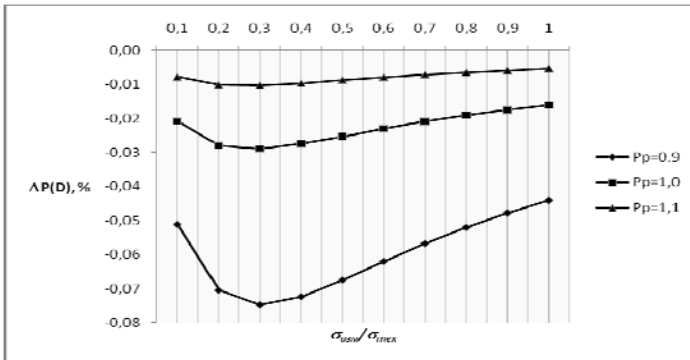


Рисунок 2.19 – Зависимости разности вероятностей правильной приемки продукции при нормальном и равновероятном распределении погрешности измерения от соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}}$ при различных значениях P_p

Анализ результатов моделирования (графики на рис. 2.16 – 2.19) позволяет сделать следующие выводы:

– при равновероятном законе распределения погрешности измерения наблюдается уменьшение вероятностей принятия

годной продукции и отбраковки бракованной по сравнению с соответствующими вероятностями при нормальном законе распределения погрешности измерения (на 0,1...14 % и 0,01...0,08 % соответственно);

– уменьшение вероятностей принятия годной продукции и отбраковки бракованной скомпенсировано увеличением вероятностей принятия бракованной продукции (на 0,01...0,08 %) и отбраковки годной (на 0,1...14 %);

– влияние изменения закона распределения погрешности измерения на достоверность контроля тем меньше, чем более стабилен производственный процесс.

2.4 Нормирование погрешности измерения при решении задач операционного контроля исходя из принятых метрологических моделей

Задачи измерений при контроле промежуточного значения параметра, получаемого в ходе технологического процесса, в формальном плане похожи на задачи измерений при приемочном контроле параметра, поскольку в большинстве случаев получаемый параметр также имеет двухсторонние ограничения. Если задан допуск промежуточного значения параметра, задача сводится к тривиальной, поскольку на дальнейшую обработку следует пропускать только заготовки соответствующего уровня качества (годные). Однако, поскольку обработка будет продолжена, заготовки с исправимым браком по контролируемому параметру можно пропускать без риска получить на выходе бракованное изделие. С другой стороны, обнаружение неисправимого брака в ходе такого контроля практически исключается, поскольку на заготовке оставляют припуск на последующую обработку. Исходя из этого, можно сделать вывод, что эффективность контроля промежуточного параметра будет достаточно высокой, даже если погрешности измерений будут сопоставимы с допуском контролируемого параметра. Из проведенного анализа вытекает, что допустимые соотношения можно принимать как

$$[\Delta] = (0,5...1,0)IT \quad (2.44)$$

При исследовании технологического процесса по результатам измерений параметров объектов необходимо получить оценки положения центров группирования этих параметров и их рассеяния. Такие исследования должны дать оценку влияния случайных факторов (обычных причин изменчивости) на ход технологического процесса, а также тенденций смещений центров группирования в ходе длительного воспроизведения технологического процесса из-за наличия систематически влияющих факторов (особых причин изменчивости). Простым и наглядным примером исследования технологического процесса, получившим широкое практическое распространение, является построение так называемых контрольных карт.

При исследовании технологического процесса приходится решать две разные исследовательские задачи с соответствующей постановкой задач измерений:

- выявление тенденции смещения положений центров группирования параметров «мгновенных выборок»;
- исследование поля практического рассеяния параметров в выборке.

В результате получения оценок этих параметров делается вывод о технологическом процессе. Рассмотрим механизм влияния погрешности измерения на достоверность заключения о действительном состоянии технологического процесса.

В случае если измерения обладают свойством правильности (отсутствия систематической составляющей погрешности в результатах измерений), погрешности измерений могут оказывать существенное влияние только на определение характеристик рассеяния контролируемых параметров в выборке. Это обстоятельство обусловлено нулевым математическим ожиданием случайной погрешности измерения. Влияние погрешностей измерений на определение характеристик положения центров группирования контролируемых параметров в каждой выборке является незначительным и обусловлено малыми объемами «мгновенных» выборок, применяемых при исследовании технологических процессов.

Искажения оценок рассеяния параметров в выборке, вызванные погрешностью измерений, может быть оценено по правилу сложения дисперсий:

$$\sigma_{\Sigma}^2 \sigma_{\text{изм}}^2 = \sigma_{\text{тех}}^2 \cdot \quad (2.45)$$

Используя данное соотношение, можно сопоставить значения рассеяния погрешностей измерения и соответствующие этим значениям искажения результирующего рассеяния. По аналогии с рекомендациями по нормированию погрешности для задачи измерений при контроле промежуточного параметра, в рассматриваемом случае можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\sigma_{\text{изм}} \leq \sigma_{\text{тех}} \quad (2.46)$$

Необходимо отметить, что в соответствии с правилом сложения дисперсий погрешность измерения в рассматриваемом случае только несколько «ухудшает» результаты контроля выборок. Другими словами, погрешность измерений может привести к принятию преждевременного решения о подналадке процесса, но в то же время снижает вероятность принятия данного решения с опозданием.

Важным свойством метрологической модели процесса операционного контроля применительно к контролю состояния технологического процесса является ее динамичность. Это свойство обусловлено тем, что каждая последующая проконтролированная деталь вносит новую измерительную информацию, приводящую к необходимости пересчета мер рассеяния и положения, полученных по результатам предыдущих измерений.

Свойство динамичности рассматриваемого класса моделей предполагает робастность математического аппарата, применяемого для расчета искомых точечных оценок.

Очевидно, что в данном случае процент выпуска фактически негодных изделий будет незначительным, поскольку поле допуска шире технологического поля рассеяния, определяемого как шесть средних квадратических отклонений $\sigma_{\text{тех}}$. В такой ситуации целесообразно перейти от контроля продукции к контролю состояния технологического процесса. Такой переход позволит сократить объем контрольных операций, что приведет к сокращению затрат на контроль.

При исследовании состояния технологического оборудования необходимо обеспечить выявление тенденции смещения положе-

ний центров группирования параметров и исследование поля практического рассеяния параметров в выборке. Для выявления тенденции смещения положений центров группирования погрешность измерения должна быть в 3 – 5 раз меньше детерминированного изменения измеряемой физической величины ε_{iQ} , что можно представить как

$$\Delta_n \leq \frac{\varepsilon_{iQ}}{3} \quad (2.47)$$

Если ожидается монотонная тенденция смещения положений центров группирования, допустимой погрешностью измерения можно управлять в разумных пределах, увеличивая временные отрезки между взятием выборок.

При исследовании поля практического рассеяния параметров в выборке для построения приемлемой гистограммы желательно добиться соотношения между реализуемой погрешностью измерения Δ_n и размахом полученных значений R'

$$\Delta_n \approx \frac{1}{10} R' \quad (2.48)$$

чего добиваются методом последовательных приближений, назначая сначала Δ_1 , а затем при необходимости $\Delta_2 < \Delta_1$, затем $\Delta_3 < \Delta_2$ и т.д., после чего полученное значение погрешности измерения Δ_n принимают за допустимое значение погрешности, т.е. $[\Delta] = \Delta_n$. Соотношение принято из тех соображений, что для построения гистограммы и полигона исследуемого распределения желательно иметь 8...12 столбцов (10 ± 2), причем допускается попадание результатов в соседние столбцы, но не «прыжок» через столбец.

При наличии монотонной тенденции смещения центров группирования параметров в выборке картины случайного распределения могут искажаться из-за наличия систематической переменной составляющей в самой выборке. Именно для исключения такого искажающего воздействия так называемые «мгновенные выборки» формируют из минимально возможного числа объектов, чтобы на характер распределения случайных величин не накладывалась детерминированная тенденция.

Контроль состояния технологического оборудования по результатам получения соответствующего параметра в первую очередь направлен на получение характеристик поля практического рассеяния параметров в выборке. Оценка среднего квадратического отклонения параметров $\sigma_{\text{тех}}$ позволяют осуществлять выбор технологического оборудования, одним из общепринятых критериев которого является выполнение условия

$$IT \geq 6\sigma_{\text{тех}} \quad (2.49)$$

Последнее соотношение можно обобщить в следующем виде:

$$IT \geq k\sigma_{\text{тех}} \quad (2.50)$$

где k – коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности и от вида случайного распределения параметра.

Приведенные рекомендации по нормированию погрешности измерения для каждой задачи операционного контроля исходя из принятых метрологических моделей обобщены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Рекомендации по нормированию погрешности измерения для каждой задачи операционного контроля

Решаемая задача	Рекомендации по нормированию допустимой погрешности измерений
контроль «конечного» параметра	нормирование погрешности при подтвержденной нормальности ее распределения осуществляется в соответствии с графиками (рисунки 2.5-2.8, 2.9-2.14) и таблицей 2.1. При неподтвержденной нормальности распределения погрешности измерения необходимо произвести расчеты по формулам 2.36-2.43.
контроль промежуточного параметра	$[\Delta] = 0,5\dots$
контроль состояния технологического процесса	$\sigma_{\text{изм}} \leq \sigma_{\text{тех}}$
контроль состояния технологического оборудования (с построением гистограммы)	$\Delta_n \approx \frac{1}{20} R'$
контроль состояния технологического оборудования (без построения гистограммы)	$IT \geq k\sigma_{\text{тех}}$

ГЛАВА 3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МВИ НА БАЗЕ ПРИНЦИПА ТЕХНОЛОГИЧЕСКО- МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО СООТВЕТСТВИЯ

3.1 Принцип технологическо-метрологического соответствия и условия, необходимые для его реализации

До настоящего времени главным и, пожалуй, единственным источником информации, определяющим исходные данные для проектирования методик выполнения измерений, являлись требования, устанавливаемые конструкторской документацией (чертежом детали). Это справедливо, если ориентироваться на то, что основным и единственным критерием, используемым для оценки качества методики, является обеспечение требуемой точности измерений. Чертеж детали несет необходимую информацию, определяющую точность геометрических параметров будущего объекта измерений. При традиционном подходе проектируемые методики контроля разрабатываются в предположении наихудшего варианта искажения размеров, формы и расположения элементов детали.

Универсальность разрабатываемых в соответствии с таким подходом методик контроля неизбежно связана с их усложнением, что ухудшает экономичность измерений в связи с необходимостью использовать более сложные средства измерений, большее число контрольных точек или сечений при реализации методики измерения, персонал высокой квалификации и т.д.

Отсутствие полноценной технологической информации об объекте контроля на стадии проектирования МВИ приводит к необоснованному усложнению методики и вызывает снижение производительности контроля.

Влияние характера технологической операции на особенности формирования макрогеометрии обрабатываемых поверхностей изложены в целом ряде работ. Большой вклад в исследование данной проблемы внесла белорусская научная школа во главе с академиком Ящерицыным П.И.

В ходе исследований технологической наследственности были определены типовые отклонения формы и расположения поверхностей, характерные для различных технологических процессов получения наиболее часто встречающихся поверхностей. Для иллюстрации этого эффекта рассмотрим примеры, приведенные в работах [33...40].

Так, например, погрешности обработки торцовых поверхностей на токарных станках связаны с изменением радиуса обработки, что приводит к изменению момента силы и упругих отжатий. Это обуславливает искажение формы протачиваемой плоскости. При торцовом точении плоскостей дисков на оправке торцовая поверхность диска после такой обработки имеет вогнутую реальную форму с большей или меньшей стрелой вогнутости. При протачивании торцовых плоскостей жестких деталей, установленных в патроне, из-за упругих отжатий шпинделя и суппорта станка поверхность получается выпуклой.

Отклонения формы поперечного сечения валов связаны с распределением сил в зажимных устройствах. Этот эффект особенно четко проявляется при обработке кольцевых заготовок в трехкулачковых патронах (3-гранная огранка) и слабо заметен при закреплении таких заготовок в патронах с распределенными силами.

Искажение формы поперечного сечения обрабатываемой заготовки возникает при использовании прямого или изогнутого поводкового хомутика. Плоскость действия изгибающего момента поводкового хомутика вращается вместе с заготовкой, а плоскости изгиба от составляющих сил резания переменных во времени неподвижны в пространстве. В результате совместного влияния указанных факторов текущий радиус-вектор поперечного сечения детали будет меняться в течение одного оборота заготовки. Если обработке подвергается деталь, заготовка которой имеет погрешность формы, то в условиях относительно стабильной жесткости технологической системы имеет место копирование этой погрешности на готовой детали. Волнистость вала в поперечном сечении, как правило, возникает за счет воспроизведения формы центровых отверстий заготовки.

На образование 3-, 5- и 7-гранной огранки отверстия оказывают влияние неподвижная и вращающаяся составляющие ра-

диальной силы и особенно неодинаковая жесткость инструмента в радиальном положении. При работе развертками с равномерным шагом расположения режущих лезвий возникает огранка отверстия, значение которой зависит от смещения оси развертки относительно исходного отверстия.

Отверстие может получить конусообразную форму из-за отклонения оси сверла от оси вращения при одностороннем резании или неравномерности заточки режущих кромок спиральных сверл, вследствие действия неуравновешенной радиальной составляющей на изменяющейся длине консоли. С увеличением глубины сверления погрешности формы возрастают в связи с тем, что радиальная жесткость системы «сверло-шпиндель» из-за увеличивающейся длины консоли снижается.

Погрешности заточки зенкеров приводят к несимметричному положению режущих кромок относительно оси вращения. В результате этого возникает неуравновешенная сила резания, которая, как и при сверлении, вызывает погрешности формы обрабатываемых отверстий. Отклонения формы отверстий увеличиваются с увеличением скорости резания, подачи, глубины резания, твердости обрабатываемого материала и обратной конусности инструмента.

На соосность отверстий, обрабатываемых с противоположных сторон, влияет несовпадение осей шпинделей противоположных силовых головок агрегатно-расточного станка, либо неточность угловой фиксации поворотного стола. Значение несоосности обработанных отверстий при известной неточности геометрии станка может быть определено аналитически.

В то же время, использование «технологической» информации возможно в случае ее постоянства, которое определяется стабильностью технологических процессов.

Современное состояние технологии позволяет говорить о возможности обеспечения высокой стабильности большинства технологических процессов [41-44]. Поскольку такие процессы дают соответствующие характерные отклонения формы и расположения поверхностей, учет детерминированных отклонений позволяет осуществлять разработку оптимизированных методик выполнения измерений. Под оптимизацией здесь понимается

возможность сокращения числа контрольных точек или сечений при выполнении требований к точности измерений и представительности получаемых результатов, либо повышение точности и достоверности результатов измерений за счет уменьшения погрешности метода.

Совершенствование технологии изготовления изделий машиностроения и приборостроения, создание современных технологий и производств является главной технической предпосылкой разработки оптимизированных методик выполнения измерений. Анализируя приведенные выше примеры, можно сказать о том, что в случае, если известна технология изготовления детали, то можно на стадии проектирования МВИ определить в ней сечения, в которых необходимо проводить измерения, а их количество свести к «достаточному» минимуму. В силу присущих конкретной технологической операции особенностей кинематики и динамики процесса, реальная форма детали будет отличаться от номинальной. Это отличие будет стабильно при налаженном технологическом процессе, а его количественные характеристики легко определены как аналитически, так и экспериментально.

В работе [33] представлены исследования поверхностей плит (с размерами от 100×100 до 4000×7000 мм) номинально плоской формы, которые показали, что 95% из них имели после изготовления форму, близкую к форме гиперболического параболоида (седла) и 5 % — форму, близкую к поверхностям эллиптического типа. Всего было установлено пять типовых моделей поверхностей, к которым приближались по форме реальные исследуемые поверхности.

То, что реальные поверхности, имеющие весьма простой вид глобальной выпуклости или впадины (выпуклые и вогнутые поверхности) наиболее часто встречаются на практике при обработке номинально плоских поверхностей также подтверждается данными, приведенными в работе [34]. При проведении государственных испытаний поверочных линеек, выпускаемых Ставропольским инструментальным заводом, было установлено, что из тридцати образцов только пять имели сложный характер поверхности, а поверхность остальных была выпуклая или вогнутая. Автором работы [35] было проведено масштабное стати-

стическое исследование множества реальных поверхностей различных объектов (поверочных линейек и мостов, поверочных и разметочных плит, направляющих станин станков и др.), а также большой совокупности теоретико-вероятностных моделей таких поверхностей. Основным результатом проведенного исследования является доказательство статистической устойчивости амплитудно-частотных спектральных характеристик макрогеометрии реальных поверхностей исследуемых объектов.

Рассмотренные 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.

Такой подход к проектированию методики выполнения измерений основан на использовании принципа технологическо-метрологического соответствия, т.е. преемственности между операциями контроля и технологическими операциями механической обработки поверхностей деталей, который можно сформулировать следующим образом.

Технологическо-метрологическое соответствие – принцип проектирования оптимизированных методик выполнения измерений геометрических параметров обрабатываемых поверхностей на основе предварительной информации о единообразии их качественных характеристик при условии использования стабильного технологического процесса их обработки.

Под единообразием качественных характеристик поверхностей деталей, получаемых при использовании одностипных технологических процессов (выполняемых на единообразном технологическом оборудовании с использованием одностипных приспособлений) понимается получение геометрически подобных отклонений формы, расположения и рельефов микрогеометрии обрабатываемых поверхностей.

Таким образом, для реализации принципа технологическо-метрологического соответствия при проектировании оптимизированных методик выполнения измерений необходимо использовать:

- априорную информацию о технологическом процессе, позволяющую выделить характерные при реализации этого процесса отклонения формы и расположения обрабатываемых поверхностей;
- информацию о точности технологического оборудования при выполнении аналогичных технологических операций или технологических процессов;
- информацию о точности контролируемых параметров, наносимую на чертежах;
- общие характерные особенности макрогеометрии совокупности реальных объектов измерения.

Исходя из предложенного подхода к классификации методов координатных измерений, сформулированного технологическо-метрологического принципа проектирования оптимизированных МВИ созданы предпосылки разработки новых методов измерения отклонений макрогеометрии реальных поверхностей, основанных на использовании априорной информации при построении аналитических моделей объектов измерения.

3.2 Обоснование возможности использования принципа технологическо-метрологического соответствия при проектировании методик выполнения координатных измерений геометрических параметров номинально плоских поверхностей деталей

Рассмотрим возможности проектирования оптимизированных МВИ геометрических параметров номинально плоских поверхно-

стей на базе априорной технологической информации об их макрогеометрии. Использование такой информации создаёт предпосылки для адекватной замены реальных поверхностей деталей упрощёнными аналитическими моделями их аппроксимирующих поверхностей, воспроизводимыми по минимально необходимому и достаточному количеству контрольных точек. Для аналитического моделирования реальных поверхностей деталей можно сформулировать два основополагающих исходных условия:

а) номинально плоские поверхности, подлежащие контролю, имеют выпуклую, вогнутую или выпукло-вогнутую реальную форму;

б) для каждой реальной поверхности всегда можно выделить низкочастотную и высокочастотные составляющие отклонений точек, характеризующие ее макрогеометрию (в рамках данного исследования ограничимся рассмотрением только погрешности формы), причем высокочастотные отклонения точек пренебрежимо малы по сравнению с доминирующей низкочастотной составляющей.

Первое условие связано с выбором в качестве объектов контроля определенного класса плоских поверхностей и базируется на априорной технологической информации.

Второе условие определяет некоторое предельное соотношение между амплитудами высших и низших гармоник отклонений точек, формирующих реальную поверхность, при которых влиянием высших гармоник на суммарную погрешность измерения низкочастотного отклонения, принимаемого за погрешность формы, можно пренебречь. Числовые значения таких предельных соотношений определяются при проведении экспериментальных исследований.

Сформулированные выше условия позволяют при оценке отклонений формы выделенного класса объектов вместо реальных поверхностей использовать аналитические модели их аппроксимирующих поверхностей, имеющих выпуклые в математическом смысле сечения. Такие аппроксимирующие поверхности должны характеризовать низкочастотные отклонения точек реальных поверхностей и удовлетворять при этом следующим требованиям.

1. Аппроксимирующие поверхности, выступающие в роли моделей реальных поверхностей деталей, должны обеспечивать

пренебрежимо малое несоответствие модели реальному объекту измерения.

2. Используемые аппроксимирующие поверхности должны достаточно просто описываться аналитически.

3. Аналитические модели аппроксимирующих поверхностей должны строиться по минимальному количеству контролируемых точек.

Исходя из этих требований, будем использовать для аппроксимации реальных поверхностей деталей различные гладкие теоретические поверхности (участки поверхностей) второго порядка, представленные в таблице 3.1 [45].

Таблица 3.1 – Типы моделей реальных поверхностей (виды аппроксимирующих поверхностей)

Наименование поверхности	Каноническое уравнение поверхности
Сфера	$x^2 + y^2 + z^2 = R^2$
Эллипсоид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
Однополостный гиперboloид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
Двуполостный гиперboloид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1$
Эллиптический параболоид	$\frac{x^2}{p} + \frac{y^2}{q} = 2z$
Гиперболический параболоид	$\frac{x^2}{p} - \frac{y^2}{q} = 2z$
Эллиптический цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$
Гиперболический цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$
Параболический цилиндр	$x^2 = 2py$
Конус второй степени	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$

В общем случае каждое нормальное сечение такой поверхности характеризуется определенной кривизной или законом изменения кривизны. Поскольку в соответствии с требованиями стандартов (ГОСТ 24642-81 и ГОСТ 24643-81) в качестве отклонения формы номинально плоской поверхности должно приниматься расстояние от прилегающей плоскости до наиболее удаленной точки реальной поверхности, нас, прежде всего, интересует то сечение поверхности, которому соответствует максимальная кривизна или максимальное изменение кривизны. Для поиска направления такого сечения необходимо исследовать используемую аппроксимирующую поверхность в некоторой локальной окрестности произвольным образом выбранной базовой точки M_O (рис. 3.1).

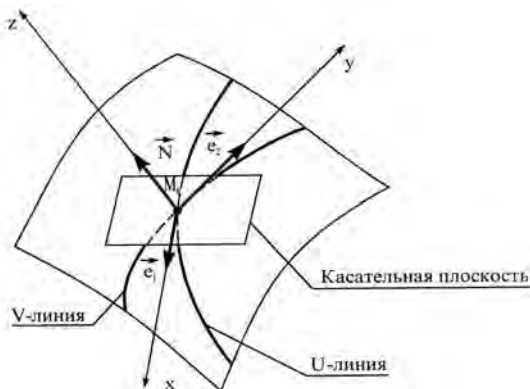


Рисунок 3.1 – Определение направлений главной кривизны аппроксимирующей поверхности

В основу такого исследования положим математический аппарат и методы дифференциальной геометрии.

Для фиксированной точки поверхности M_O всегда можно выбрать такую декартову систему координат $Oxyz$, начало которой будет лежать в точке M_O , а плоскость Oxy будет совпадать с касательной плоскостью, проходящей через точку M_O . В этой системе координат поверхность (в некоторой окрестности точки M_O) может быть представлена в виде $z = z(x, y)$, причем:

$$z(0,0) = \frac{\partial z(0,0)}{\partial x} = \frac{\partial z(0,0)}{\partial y}. \quad (3.1)$$

Соответствующий сопровождающий трехгранник в точке M_0 состоит из трех единичных векторов \vec{e}_1 , \vec{e}_2 и $\vec{N} = \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2$, которые направлены по соответствующим координатным осям (см. рис. 3.1). Разложение по формуле Тейлора в окрестности точки M_0 имеет вид:

$$z = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z(0,0)}{\partial x^2} x^2 + \frac{\partial^2 z(0,0)}{\partial x \partial y} xy + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 z(0,0)}{\partial y^2} y^2 + \dots \quad (3.2)$$

Поворотом декартовой системы координат вокруг оси Oz можно добиться того, чтобы выполнялось равенство:

$$z = \frac{1}{2} (k_1 \cdot x^2 + k_2 \cdot y^2) + \dots \quad (3.3)$$

Параметры k_1 и k_2 называются главными кривизнами, а $R_1 = 1/k_1$ и $R_2 = 1/k_2$ – главными радиусами кривизны в базовой точке M_0 . Симметрические функции $H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$ и $K = k_1 \cdot k_2$ называются соответственно средней и полной (гауссовой) кривизной.

Следовательно, на поверхности всегда существует два взаимно перпендикулярных направления, в которых кривизны профилей соответствующих нормальных сечений в выбранной базовой точке M_0 равны главным кривизнам k_1 и k_2 . Эти направления соответствуют направлениям осей выделенной системы координат и называются направлениями главной кривизны, а соответствующие им сечения – главными нормальными сечениями поверхности.

В зависимости от соотношения главных кривизн k_1 и k_2 поверхности в базовой точке M_0 , последняя может быть отнесена к категории омбилических или неомбилических точек. Точка поверхности, в которой кривизна k_N имеет одно и то же значение для всех профилей нормальных сечений называется омбилической. Омбилической является любая точка сферы, отдельные точки

эллипсоида, параболоида и др. Неомбилические точки характеризуются тем, что в них всегда существуют два нормальных сечения (главные нормальные сечения), которым соответствуют наибольшее значение k_1 и наименьшее значение k_2 кривизны k_N (главные кривизны поверхности S в точке M_O).

Поскольку главные направления в любой точке поверхности характеризуются экстремальными значениями кривизны k_N , то задача контроля выделенного класса поверхностей может быть сведена к определению главных направлений и главных кривизн поверхности k_1 и k_2 в некоторой базовой точке M_O по минимальному количеству контрольных точек. Для решения этой задачи можно использовать известную из дифференциальной геометрии теорему Эйлера. Согласно этой теореме, плоскости главных нормальных сечений взаимно перпендикулярны и для любого профиля нормального сечения, плоскость которого образует угол Θ с плоскостью первого главного нормального сечения, в точке M_O справедливо равенство:

$$k_N = k_1 \cdot \cos^2 \theta + k_2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (3.4)$$

Таким образом, можно определить кривизну профиля любого нормального сечения k_N поверхности в некоторой базовой точке M_O при условии, что известны главные кривизны k_1 и k_2 и направления главной кривизны, определяемые углом Θ . Отсюда следует, что для определения параметров k_1 , k_2 и Θ аппроксимирующей поверхности необходимо и достаточно найти кривизны k_N профилей трех любых нормальных сечений поверхности в некоторой базовой точке M_O . Это обеспечивает возможность построить систему трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными (k_1 , k_2 и Θ), которая может быть решена одним из существующих численных методов.

Решение системы позволит определить численные значения параметров k_1 , k_2 и Θ , а также судить о виде аппроксимирующей поверхности в некоторой локальной окрестности базовой точки M_O . Тип выделенной базовой точки, а также вид локальной окрестности этой точки аппроксимирующей поверхности можно

определить, пользуясь информацией, представленной в таблице 3.2. [45].

Таблица 3.2. Типы точек и виды локальных окрестностей точек аппроксимирующих поверхностей

Вид локальной окрестности базовой точки	Тип базовой точки	Критерий идентификации аппроксимирующей поверхности	Вид аппроксимирующей поверхности
Круговая (профили нормальных сечений все выпуклы или вогнуты; поверхность не пересекает касательную плоскость)	Омбилическая	$K = k_1 \cdot k_2 > 0;$ $k_1 = k_2$	Сфера
Эллиптическая (профили нормальных сечений все выпуклы или вогнуты; поверхность не пересекает касательную плоскость)	Неомбилическая	$K = k_1 \cdot k_2 > 0;$ $k_1 \neq k_2$	Эллипсоид
Параболическая (характерны выпуклые, вогнутые и прямолинейные профили нормальных сечений; поверхность не пересекает касательную плоскость)	Неомбилическая	$K = k_1 \cdot k_2 = 0$ а) $k_1^2 + k_2^2 \neq 0$ б) $k_1 = k_2 = 0$	Параболоид Цилиндр Плоскость
Гиперболическая (имеются как выпуклые, так и вогнутые профили нормальных сечений; поверхность пересекает касательную плоскость)	Неомбилическая	$K = k_1 \cdot k_2 < 0$	Однополостный гиперболоид

Как правило, размеры контролируемых поверхностей несоизмеримо малы в сопоставлении с радиусами кривизны аппроксимирующих поверхностей (в силу незначительного относительного искривления поверхностей из-за погрешностей их формы в пределах нормируемого участка). Это позволяет, выбирая произвольным образом базовую точку на контролируемой поверхности (желательно в центральной ее области), рассматривать всю поверхность как некоторую локальную окрестность

выделенной базовой точки и исследовать ее рассмотренными выше методами дифференциальной геометрии.

При таком подходе задача контроля отклонений формы номинально плоских поверхностей, имеющих выпуклую, вогнутую или выпукло-вогнутую реальную форму, сводится к разработке методов определения кривизн (радиусов кривизны) профилей аппроксимирующих поверхностей в некоторых нормальных сечениях (минимум трех) по результатам измерения отклонений или координат некоторого количества контрольных точек. Используя сформулированный принцип технологическо-метрологического соответствия, можно осуществить эту процедуру по минимальному количеству контрольных точек. Особенность аналитического моделирования реальных поверхностей состоит в том, что аналитическая модель каждой конкретной поверхности представляется не в виде некоторого частного уравнения ее аппроксимирующей поверхности, а в виде числовых значений трех ее определяющих параметров (k_1 , k_2 и Θ). В результате последующего анализа значений этих параметров определяется характер аппроксимирующей поверхности, что позволяет записать ее аналитическое выражение в общем виде. При этом не исключено, что одному и тому же сочетанию числовых значений определяющих параметров могут быть поставлены в соответствие несколько близких по характеру аппроксимирующих поверхностей. Так, например, если выполняются условия $K = k_1 \times k_2 = 0$ и $k_1^2 + k_2^2 \neq 0$, то в качестве аппроксимирующей поверхности может быть принят как эллиптический, так и гиперболический цилиндр. Очевидно, что такая неопределенность аппроксимации в данном случае будет выступать в качестве одного из источников несоответствия принятой модели реальному объекту измерения, вызывающего методическую погрешность.

Кроме рассмотренного выше, возможен также вариант построения аналитических моделей реальных поверхностей, основанный на определении конкретных аналитических выражений

или уравнений аппроксимирующих поверхностей по результатам измерения отклонений или координат минимального количества контрольных точек. Причем, требуемое количество контрольных точек должно определяться, исходя из условия однозначного определения вида и уравнения аппроксимирующей поверхности. Таким образом, задача сводится к обоснованию минимально необходимого, но достаточного количества задаваемых точек для однозначного определения гладкой теоретической поверхности второго порядка. Математически данную задачу в наиболее общем виде можно сформулировать следующим образом.

В трехмерном пространстве задано m произвольных точек M_k (x_k, y_k, z_k), $k = 1, 2, 3, \dots, m$, своими координатами в фиксированной прямоугольной декартовой системе координат $Oxyz$. Требуется найти уравнение поверхности второго порядка.

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (3.5)$$

В уравнении a_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$) – вещественные числа, не равные нулю, одновременно проходящей через все точки M_k , $k = 1, 2, 3, \dots, m$ и исследовать единственность решения.

Следует отметить, что для существования решения (3.5.) в общем случае достаточно ограничиться условием $m \leq 9$, так как уже при $m = 10$ можно выделить набор точек M_k , $k = 1, 2, 3, \dots, 10$, для которого поставленная задача оказывается неразрешимой. С целью обоснования такого вывода рассмотрим в качестве примера следующий набор из десяти точек:

$M_1(0, 0, 0)$, $M_2(1, 0, 0)$, $M_3(0, 1, 0)$, $M_4(0, 0, 1)$, $M_5(-1, 0, 0)$, $M_6(0, -1, 0)$, $M_7(0, 0, -1)$, $M_8(1, 0, 1)$, $M_9(0, 1, 1)$, $M_{10}(1, 1, 0)$.

Допустим, что существует поверхность, проходящая через эти точки. Тогда, подставляя координаты этих точек в уравнение (3.5), для определения чисел a_{ij} получаем линейную систему 10-го порядка:

$$\begin{cases}
 a_{44} = 0 \\
 a_{11} + 2a_{14} + a_{44} = 0 \\
 a_{22} + 2a_{24} + a_{44} = 0 \\
 a_{33} + 2a_{34} + a_{44} = 0 \\
 a_{11} - 2a_{14} + a_{44} = 0 \\
 a_{22} - 2a_{24} + a_{44} = 0 \\
 a_{33} - 2a_{34} + a_{44} = 0 \\
 a_{11} + a_{33} + 2a_{13} + 2a_{14} + 2a_{34} + a_{44} = 0 \\
 a_{22} + a_{33} + 2a_{23} + 2a_{24} + 2a_{34} + a_{44} = 0 \\
 a_{11} + a_{22} + 2a_{12} + 2a_{14} + 2a_{24} + a_{44} = 0
 \end{cases} \quad (3.6)$$

Единственным решением этой системы будут значения $a_{ij} = 0$ ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$). Следовательно, не существует поверхности, удовлетворяющей условию (3.5), одновременно проходящей через все выбранные точки $M_k, k = 1, 2, 3, \dots, 10$.

Несложно также доказать, что если $1 \leq m \leq 8$, то, какие бы ни были точки $M_k, k = 1, 2, 3, \dots, m$, через них всегда можно провести, по крайней мере, две поверхности второго порядка. Очевидно, что достаточно рассмотреть случай $m = 8$. Тогда, подставляя координаты произвольных восьми точек $M_k(x_k, y_k, z_k), k = 1, 2, 3, \dots, 8$, в уравнение (3.5), для определения значений коэффициентов a_{ij} получим линейную однородную систему с матрицей размера 8×10 :

$$A = \begin{bmatrix}
 x_1^2, y_1^2, z_1^2, 2x_1y_1, 2x_1z_1, 2y_1z_1, 2x_1, 2y_1, 2z_1, 1 \\
 x_2^2, y_2^2, z_2^2, 2x_2y_2, 2x_2z_2, 2y_2z_2, 2x_2, 2y_2, 2z_2, 1 \\
 x_3^2, y_3^2, z_3^2, 2x_3y_3, 2x_3z_3, 2y_3z_3, 2x_3, 2y_3, 2z_3, 1 \\
 x_4^2, y_4^2, z_4^2, 2x_4y_4, 2x_4z_4, 2y_4z_4, 2x_4, 2y_4, 2z_4, 1 \\
 x_5^2, y_5^2, z_5^2, 2x_5y_5, 2x_5z_5, 2y_5z_5, 2x_5, 2y_5, 2z_5, 1 \\
 x_6^2, y_6^2, z_6^2, 2x_6y_6, 2x_6z_6, 2y_6z_6, 2x_6, 2y_6, 2z_6, 1 \\
 x_7^2, y_7^2, z_7^2, 2x_7y_7, 2x_7z_7, 2y_7z_7, 2x_7, 2y_7, 2z_7, 1 \\
 x_8^2, y_8^2, z_8^2, 2x_8y_8, 2x_8z_8, 2y_8z_8, 2x_8, 2y_8, 2z_8, 1
 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

При этом число линейно-независимых наборов-решений $(a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{44})$ полученной системы, как следует из общей теории решения линейных систем уравнений равно разности между числом неизвестных и рангом матрицы A и будет удовлетворять условию так как всегда для матрицы, состоящей из восьми строк, справедливо неравенство $\text{rank } A \leq 8$:

$$10 - \text{rank } A \geq 2, \quad (3.8)$$

Таким образом, можно утверждать, что для $m = 8$ всегда можно найти по крайней мере две поверхности второго порядка, проходящие через восемь выбранных точек $M_k, k = 1, 2, 3, \dots, 8$. Из произвольности рассматриваемых точек следует, что описанное выше свойство будет иметь место и для любого $1 \leq m \leq 8$. Проведенное исследование возможности однозначного определения поверхности второго порядка вида (3.5) для случаев $m \geq 10$ и $1 \leq m \leq 8$ позволяет для единственного оставшегося варианта $m = 9$ сформулировать следующую теорему.

Теорема. *Для того чтобы через девять произвольно выбранных точек $M_k (x_k, y_k, z_k), k = 1, 2, 3, \dots, 9$, проходила единственная поверхность второго порядка вида (3.5), необходимо и достаточно, чтобы ранг матрицы B размером 9×10 определяющей линейную однородную систему уравнений относительно $a_{ij} (i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4)$, был равен девяти.*

$$B = \begin{bmatrix} x_1^2, y_1^2, z_1^2, 2x_1y_1, 2x_1z_1, 2y_1z_1, 2x_1, 2y_1, 2z_1, 1 \\ x_2^2, y_2^2, z_2^2, 2x_2y_2, 2x_2z_2, 2y_2z_2, 2x_2, 2y_2, 2z_2, 1 \\ x_3^2, y_3^2, z_3^2, 2x_3y_3, 2x_3z_3, 2y_3z_3, 2x_3, 2y_3, 2z_3, 1 \\ x_4^2, y_4^2, z_4^2, 2x_4y_4, 2x_4z_4, 2y_4z_4, 2x_4, 2y_4, 2z_4, 1 \\ x_5^2, y_5^2, z_5^2, 2x_5y_5, 2x_5z_5, 2y_5z_5, 2x_5, 2y_5, 2z_5, 1 \\ x_6^2, y_6^2, z_6^2, 2x_6y_6, 2x_6z_6, 2y_6z_6, 2x_6, 2y_6, 2z_6, 1 \\ x_7^2, y_7^2, z_7^2, 2x_7y_7, 2x_7z_7, 2y_7z_7, 2x_7, 2y_7, 2z_7, 1 \\ x_8^2, y_8^2, z_8^2, 2x_8y_8, 2x_8z_8, 2y_8z_8, 2x_8, 2y_8, 2z_8, 1 \\ x_9^2, y_9^2, z_9^2, 2x_9y_9, 2x_9z_9, 2y_9z_9, 2x_9, 2y_9, 2z_9, 1 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

Доказательство

Необходимость. Предположим, что ранг матрицы B меньше девяти, т.е. справедливо неравенство

$$\text{rank } B < 9. \quad (3.10)$$

Тогда число r линейно-независимых наборов-решений $(a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{44})$ рассматриваемой системы уравнений будет равно что противоречит условию единственности решения.

$$r = 10 - \text{rank } B > 1, \quad (3.11)$$

Достаточность. Пусть ранг матрицы B равен девяти, т.е. справедливо тождество

$$\text{rank } B = 9. \quad (3.12)$$

Тогда

$$r = 10 - \text{rank } B = 10 - 9 = 1. \quad (3.13)$$

Это означает, что рассматриваемая система уравнений имеет только один ненулевой линейно-независимый набор-решение $(a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{44})$, которому соответствует единственная поверхность второго порядка, одновременно проходящая через все выделенные точки $M_k(x_k, y_k, z_k)$, $k = 1, 2, \dots, 9$.

Доказанная теорема позволяет утверждать, что для однозначного определения поверхности второго порядка необходимо и достаточно задать девять точек, координаты которых в декартовой системе координат $Oxyz$ должны удовлетворять условию (3.12).

Таким образом, для аналитического моделирования рассматриваемых реальных поверхностей путем определения конкретных аналитических выражений или уравнений их аппроксимирующих поверхностей (в качестве которых выступают различные гладкие теоретические поверхности второго порядка), требуется измерить отклонения или координаты минимум девяти контрольных точек.

Аналитические модели в виде конкретных уравнений аппроксимирующих поверхностей характеризуются большей ин-

формативностью, а, следовательно, и более широкими возможностями с точки зрения последующей оценки различных геометрических параметров контролируемых поверхностей. При таком моделировании можно добиться большего соответствия аналитической модели реальной поверхности и обеспечить более высокую достоверность получаемого на этой основе результата оценки отклонения формы контролируемой поверхности.

3.2.1 Метод координатных измерений отклонений от плоскостности с использованием аналитического моделирования реальных поверхностей по четырем контрольным точкам (метод «четырёх точек»)

На контролируемой поверхности выбирается некоторая базовая точка M_0 . Далее рассматривается произвольный профиль нормального сечения поверхности плоскостью, случайным образом направленной и проходящей через выделенную базовую точку (рис. 3.2). Поскольку поверхность исследуется в локальной окрестности точки M_0 , то любой профиль может быть аппроксимирован дугой окружности, радиус которой R должен соответствовать кривизне аппроксимирующей поверхности в этой точке в выделенном направлении.

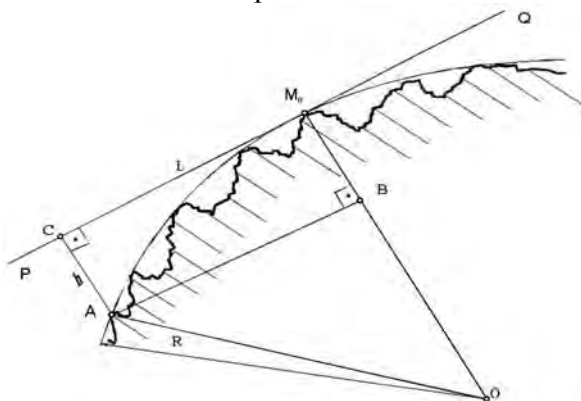


Рисунок 3.2 – Аппроксимация профиля нормального сечения реальной поверхности

Предположим, что такая дуга определена, тогда проведем в точке M_O касательную PQ , заменяющую соответствующую прямую в прилегающей плоскости (см. рис. 3.2). Если теперь допустить, что на некотором фиксированном расстоянии L ($L = |M_OC| = |AB|$) от базовой точки, откладываемом вдоль прямой PQ , в результате измерения определено отклонение h ($h = |M_OB| = |AC|$) точки реального профиля от этой прямой, то из получающегося в итоге прямоугольного треугольника OAB может быть определен интересующий нас радиус кривизны R ($R = |OA| = |OM_O|$).

$$R^2 = L^2 + (R - h)^2. \quad (3.14)$$

В результате:

$$R = \frac{L^2 + h^2}{2h}. \quad (3.15)$$

Таким образом, для того чтобы определить кривизну k_N ($k_N = 1/R$) профиля нормального сечения поверхности в базовой точке M_O , достаточно иметь на профиле всего две контрольные точки (включая базовую).

Для определения главных направлений и главных кривизн (радиусов кривизны) аппроксимирующей поверхности в базовой точке M_O будем рассматривать три профиля нормальных сечений поверхности плоскостями, произвольным образом направленными и проходящими через точку M_O .

Пусть в точке M_O определена касательная плоскость и она совпадает с плоскостью Oxy декартовой системы координат, выбранной произвольным образом. Направления рассматриваемых трех нормальных сечений, а также двух главных нормальных сечений можно определить в выделенной системе координат по соответствующим им прямым в касательной плоскости. Причем, в данном случае эти направления удобно охарактеризовать углами между соответствующими прямыми и осью Ox . Так, на рис.3.3 прямым AM_O , BM_O и CM_O , определяющим три рассматриваемых произвольных нормальных сечения поверхности, соответствуют углы α , β и γ в выделенной системе координат Oxy , а прямым R_1M_O и R_2M_O

(векторам r_1 и r_2), определяющим главные направления поверхности в точке M_0 , — углы Θ и $\Theta + \pi/2$ соответственно

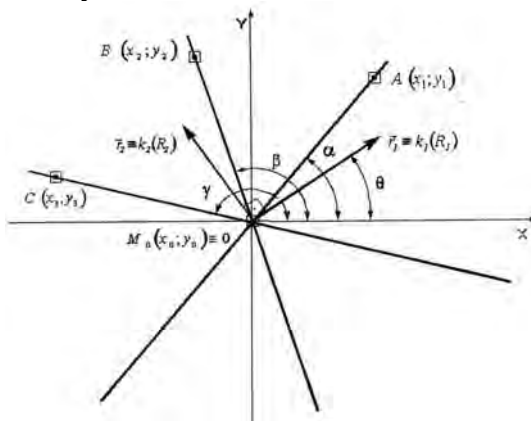


Рисунок 3.3 – Выбор направлений нормальных сечений реальной поверхности и расположения контрольных точек при реализации метода «четырёх точек»

На каждом из трех профилей нормальных сечений выберем по одной контрольной точке в локальной окрестности базовой точки M_0 (точки A , B и C на рис.3.3 являются их проекциями на плоскость Oxy , проходящую через точку M_0). Если теперь считать, что для каждой из этих точек в результате измерений определено отклонение от плоскости Oxy (координата z), то для нахождения радиусов кривизны аппроксимирующей поверхности в трех выделенных направлениях можно использовать описанный выше способ:

$$R_\alpha = \frac{L_A^2 + h_A^2}{2h_A}, R_\beta = \frac{L_B^2 + h_B^2}{2h_B}, R_\gamma = \frac{L_C^2 + h_C^2}{2h_C}. \quad (3.16)$$

Последние выражения в обобщенном виде можно представить как

$$R_i = (L_i^2 + h_i^2)/(2h_i), \quad (3.17)$$

где i – номер рассматриваемого профиля нормального сечения, $i = 1, 2, 3$. Параметры h_i и L_i определяются следующим образом:

$$h_i = z_i - z_0, \quad (3.18)$$

$$l_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}. \quad (3.19)$$

Для определения значений углов α , β и γ , характеризующих направления рассматриваемых нормальных сечений поверхности, также можно использовать выражения

$$\varphi_i = \arctg\left(\frac{y_i - y_0}{x_i - x_0}\right), \text{ если } x_i - x_0 \neq 0, \quad (3.20)$$

$$\varphi_i = \pi/2, \text{ если } x_i - x_0 = 0. \quad (3.21)$$

Очевидно, что при этом $\alpha = \varphi_1$, $\beta = \varphi_2$ и $\gamma = \varphi_3$.

Выражая значения соответствующих кривизн аппроксимирующей поверхности в трех выделенных направлениях (k_α , k_β и k_γ) через главные кривизны k_1 и k_2 на основании формулы Эйлера (3.4), получим систему трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} k_\alpha = k_1 \cos^2(\theta - \alpha) + k_2 \sin^2(\theta - \alpha), \\ k_\beta = k_1 \cos^2(\theta - \beta) + k_2 \sin^2(\theta - \beta), \\ k_\gamma = k_1 \cos^2(\theta - \gamma) + k_2 \sin^2(\theta - \gamma). \end{cases} \quad (3.22)$$

Используя замену $k = 1/R$, приведем эту систему к следующему виду:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_\alpha} = \frac{\cos^2(\theta - \alpha)}{R_1} + \frac{\sin^2(\theta - \alpha)}{R_2}, \\ \frac{1}{R_\beta} = \frac{\cos^2(\theta - \beta)}{R_1} + \frac{\sin^2(\theta - \beta)}{R_2}, \\ \frac{1}{R_\gamma} = \frac{\cos^2(\theta - \gamma)}{R_1} + \frac{\sin^2(\theta - \gamma)}{R_2}. \end{cases} \quad (3.23)$$

Корни системы (3.23) R_1 , R_2 и Θ характеризуют главные радиусы кривизны и главные направления (положение прямых

Тогда

$$\begin{cases} \frac{\cos^2(x_3 - \alpha)}{x_1} + \frac{\sin^2(x_3 - \alpha)}{x_2} - \frac{1}{R_\alpha} = 0 \\ \frac{\cos^2(x_3 - \beta)}{x_1} + \frac{\sin^2(x_3 - \beta)}{x_2} - \frac{1}{R_\beta} = 0 \\ \frac{\cos^2(x_3 - \gamma)}{x_1} + \frac{\sin^2(x_3 - \gamma)}{x_2} - \frac{1}{R_\gamma} = 0. \end{cases} \quad (3.25)$$

При использовании метода сопряженных градиентов Флетчера-Ривса решение такой системы сводится к задаче минимизации функции

$$f(x) = \sum_{i=1}^3 (f_i(x))^2, \quad (3.26)$$

где $f_i(x)$, $i = 1, 2, 3$ – левые части системы (3.25). Для решения поставленной задачи принимаем за основу общий алгоритм реализации метода Флетчера-Ривса, внося в него следующие изменения и дополнения.

1. Начальное приближение $x^{(0)}$ ($x_1^{(0)}$, $x_2^{(0)}$, $x_3^{(0)}$) задается близким по значениям к известным радиусам кривизны профилей трех нормальных сечений и направлениям этих нормальных сечений, либо принимается по умолчанию: $x^{(0)} = (1, 1, 1)$, если радиусы кривизны профилей нормальных сечений положительны, то аппроксимирующая поверхность выпукла; $x^{(0)} = (-1, -1, 1)$, если радиусы отрицательны, то поверхность вогнута; $x^{(0)} = (-1, 1, 1)$, если есть радиусы разных знаков, то поверхность выпукло-вогнута.

2. Задача одномерной минимизации по α функции $f(x)$.

$$f(x^{(k)} + \alpha_k d^{(k)}) = \min f(x^{(k)} + \alpha d^{(k)}), \quad (3.27)$$

где α_k – величина шага, выбираемая из условия минимума функции $f(x)$ по α в направлении движения, решается методом кубической интерполяции.

3. Критерий завершения итерационного процесса: либо совместное выполнение условий малости градиента и малости приращения аргумента

большое по абсолютной величине значение одного из главных радиусов кривизны, например, справедливость неравенств:

$$\left| x_1^{(k+1)} \right| > 10^{20} \text{ или } \left| x_2^{(k+1)} \right| > 10^{20}, \quad (3.34)$$

либо выполнение условия малости приращения аргумента, т.е.

$$\left\| x^{(k+1)} - x^{(k)} \right\| = \left\| \Delta x^{(k)} \right\| \leq \varepsilon. \quad (3.35)$$

Первое условие добавлено, чтобы учесть особенности поведения решения для поверхностей параболического типа. Норма вектора $\Delta x^{(k)}$ при этом определяется как

$$\left\| \Delta x^{(k)} \right\| = \max_{1 \leq i \leq 3} \left| \Delta x_i^{(k)} \right| \quad (3.36)$$

Найденные в итоге корни системы уравнений (3.23) позволяют представить аналитическую модель реальной поверхности в виде трех определяющих параметров ее аппроксимирующей поверхности, что записывается как $[R_1, R_2, \Theta]$ или $[k_1, k_2, \Theta]$. При этом вид аппроксимирующей поверхности определяется по полученным значениям параметров k_1 и k_2 с помощью критериев идентификации поверхностей, представленных в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Критерии идентификации аппроксимирующих поверхностей (определения моделей реальных поверхностей)

Вид аппроксимирующей поверхности	Критерий идентификации поверхности
Сфера	$K = k_1 \cdot k_2 > 0; k_1 = k_2$
Эллипсоид	$K = k_1 \cdot k_2 > 0; k_1 \neq k_2$
Однополостный гиперboloид	$K = k_1 \cdot k_2 = 0$
Двуполостный гиперboloид	$K = k_1 \cdot k_2 < 0$
Эллиптический параболоид	$K = k_1 \cdot k_2 < 0$
Гиперболический параболоид	$K = k_1 \cdot k_2 = 0$
Эллиптический цилиндр	$K = k_1 \cdot k_2 = 0; k_1^2 + k_2^2 \neq 0$
Гиперболический цилиндр	$K = k_1 \cdot k_2 = 0; k_1^2 + k_2^2 \neq 0$
Параболический цилиндр	$K = k_1 \cdot k_2 = 0; k_1 + k_2 \neq 0$
Конус второй степени	$K = k_1 \cdot k_2 = 0; k_1^2 + k_2^2 \neq 0$
Плоскость	$K = k_1 \cdot k_2 = 0; k_1 = k_2 = 0$

После построения аналитической модели реальной поверхности необходимо определить отклонения формы этой поверхности Δ . Для этого в одном из главных направлений, характеризуемом максимальной кривизной профиля нормального сечения аппроксимирующей поверхности (или минимальным радиусом), реальный профиль поверхности аппроксимируется дугой окружности того же радиуса R (рис.3.4).

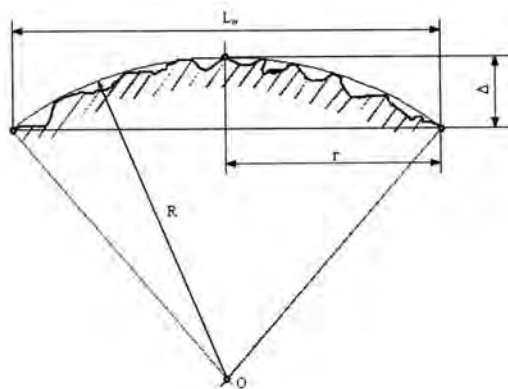


Рисунок 3.4 – Определение отклонения формы контролируемой поверхности

Зная положение главных направлений в декартовой системе координат Oxy (угол Θ), следует определить длину нормируемого участка L_N контролируемой поверхности в выделенном главном направлении (в соответствии с ее конфигурацией), причем сама конфигурация может быть описана аналитически на основании чертежа детали. Тогда отклонение формы контролируемой поверхности Δ (отклонение от плоскостности) будет определяться следующим образом

$$\Delta = R - \sqrt{R^2 - L_N^2 / 4} . \quad (3.37)$$

Очевидно, что для контролируемых поверхностей круглой конфигурации следует принимать $L_N = d = 2r$.

Если же конфигурация контролируемых поверхностей прямоугольная, то отклонение по формуле (3.37) необходимо определять как в направлении, соответствующем минимальному радиусу кривизны R_{\min} (R_1 или R_2), так и в направлениях диагоналей прямоугольника. Искомым отклонением формы следует считать максимальное из полученных значений.

При контроле поверхностей более сложной конфигурации подход остается тем же. Отклонения формы должны определяться как в направлении минимального радиуса кривизны R_{\min} (R_1 или R_2), так и в направлении (направлениях) максимальной протяженности контролируемой поверхности (если они не совпадают), а в качестве искомого отклонения следует принимать максимальное из полученных значений отклонений.

В основу разработанного метода «четырёх точек» было положено допущение, что отсчетная плоскость отклонений контрольных точек h (h_α , h_β , h_γ), координатная плоскость Oxy и плоскость, касательная к аппроксимирующей поверхности в базовой точке M_0 – совпадают. В действительности, из-за неизбежного проявления отклонения расположения контролируемой поверхности касательная плоскость никогда не будет совпадать с плоскостью Oxy , по отношению к которой отсчитываются отклонения точек, что вызывает соответствующую методическую погрешность. Более совершенным в этом отношении является метод «семи точек», позволяющий учесть при контроле отклонения от плоскостности существующее отклонения расположения реальной поверхности и аналитически свести к нулю рассматриваемую методическую погрешность.

3.2.2 Метод координатных измерений отклонений от плоскостности с использованием аналитического моделирования реальных поверхностей по семи контрольным точкам (метод «семи точек»)

В основу аналитического моделирования реальных поверхностей деталей по семи контрольным точкам положена также как и в методе «четырёх точек» теорема Эйлера о главных кри-

визнах и главных направлениях кривизны любой поверхности. Различие состоит в способе определения кривизн или радиусов кривизны выделяемых трех профилей нормальных сечений в некоторой базовой точке исследуемой поверхности.

В рассматриваемом методе для построения аналитической модели выпуклой в математическом смысле поверхности, аппроксимирующей реальную, используются семь контрольных точек, характерным образом расположенных на контролируемой поверхности (по три точки на каждом из трех профилей нормальных сечений реальной поверхности, причем одна из них общая – точка пересечения профилей M_0 , принимаемая в качестве базовой) (рис. 3.5).

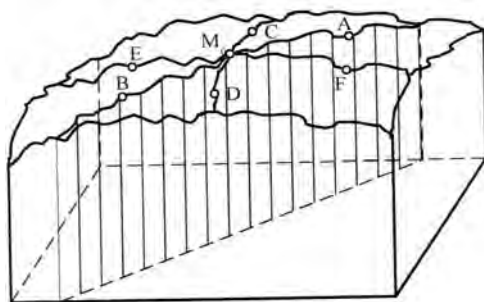


Рисунок 3.5 – Расположение контрольных точек при реализации метода «семи точек»

Как и в методе «четырёх точек», предполагается, что касательная плоскость, проходящая через точку M_0 , совпадает с плоскостью Oxy декартовой системы координат, принятой за основу для определения координат рассматриваемых контрольных точек. Точки на каждом из трех профилей нормальных сечений выбираются таким образом, чтобы их проекции на плоскость Oxy лежали на одной прямой с точкой M_0 (на рис.3.6 A' , B' , C' , D' , E' , F' – проекции контрольных точек на плоскость Oxy). Тогда направления трех рассматриваемых нормальных сечений, а также двух главных нормальных сечений можно определить в принятой системе коор-

динат по соответствующим им прямым в касательной плоскости (т.е. по углам между этими прямыми и осью Ox , как в методе «четырёх точек») (см. рис. 3.6, углы α , β , γ и Θ).

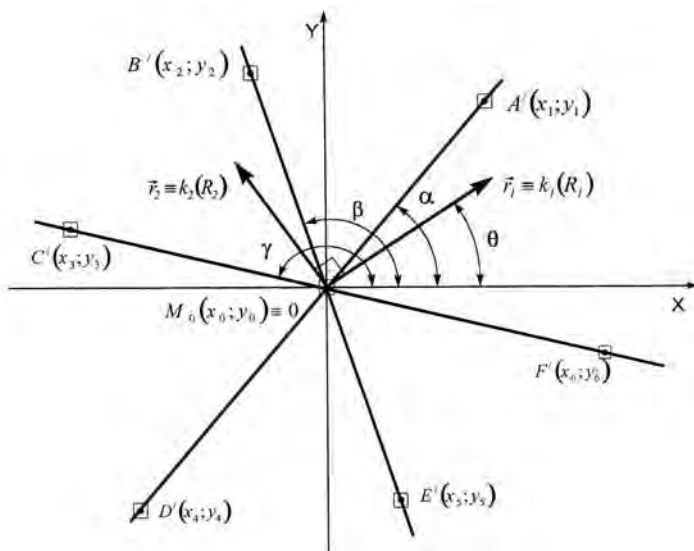


Рисунок 3.6 – Выбор направлений нормальных сечений реальной поверхности при реализации метода «семи точек»

Профили реальной поверхности в каждом из трех нормальных сечений аппроксимируются дугами окружностей, радиусы которых соответствуют кривизнам аппроксимирующей поверхности в базовой точке в выделенных направлениях. Эти окружности будем рассматривать как окружности, описанные около треугольников, вершинами которых являются базовая точка M_0 (общая для всех трех треугольников) и по две точки в каждом нормальном сечении поверхности для каждого треугольника. Так как координаты точек известны, радиусы можно определить следующим образом (на примере треугольника AM_0B , рис. 3.7):

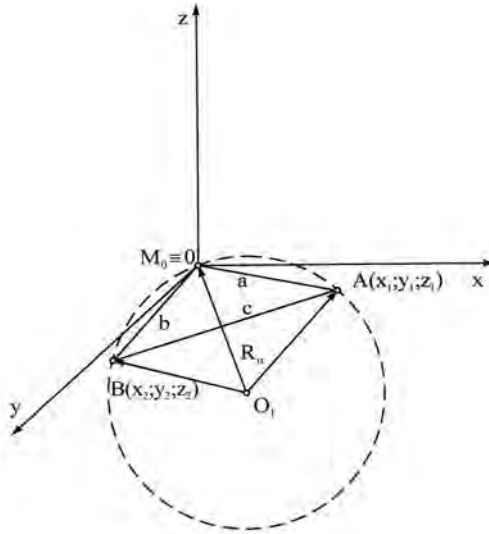


Рисунок 3.7 – Определение радиуса кривизны профиля нормального сечения реальной поверхности по трем контрольным точкам, принадлежащим профилю

$$R_{\alpha} = abc / (4S), \quad (3.38)$$

где $R_{\alpha} = |OA| = |OB| = |OM_O|$ – искомый радиус кривизны аппроксимирующей поверхности;

a, b, c – стороны треугольника: $a = |AM_O|, b = |BM_O|, c = |AB|,$

S – площадь треугольника, определяемая по формуле Герона:

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}, \quad (3.39)$$

где $p = (a + b + c) / 2$ — полупериметр рассматриваемого треугольника.

При этом длины сторон этого треугольника рассчитываются на основании следующих выражений:

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \\
 b &= \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2} \\
 c &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.
 \end{aligned}
 \tag{3.40}$$

Радиусы кривизны второго и третьего профилей нормальных сечений, задаваемых углами β и γ соответственно, определяются аналогичным образом.

Значение угла α , определяющего направление первого из рассматриваемых нормальных сечений поверхности, находится следующим образом:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0}\right), \text{ если } x_2 - x_0 \neq 0, \tag{3.41}$$

$\alpha = \pi/2$, если $x_2 - x_0 = 0$.

Значения углов β и γ , определяющих направления второго и третьего нормальных сечений соответственно, рассчитываются на основании аналогичных аналитических выражений.

После выполнения таких промежуточных расчетов строится система нелинейных уравнений для определения главных радиусов кривизны и главных направлений, аналогичная системе (3.23) в методе «четырёх точек». В результате решения этой системы уравнений определяются параметры R_1 , R_2 и Θ аппроксимирующей поверхности и находится отклонение формы Δ реальной поверхности аналогично тому, как это делается в методе «четырёх точек».

Рассмотренные методы аналитического моделирования реальных поверхностей деталей по четырем и семи контрольным точкам имеют общую теоретическую основу и, следовательно, характеризуются некоторыми общими специфическими особенностями. Такой особенностью, например, является необходимость выделения одной из контрольных точек в качестве базо-

вой и расположения ее как можно ближе к центру исследуемой поверхности.

3.2.3 Метод координатных измерений отклонений от плоскостности с использованием аналитического моделирования реальных поверхностей по девяти контрольным точкам (метод «девяти точек»)

В основе данного метода лежит теорема о минимально необходимом, но достаточном количестве задаваемых точек для однозначного определения гладкой теоретической поверхности второго порядка. В соответствии с этой теоремой, для аналитического моделирования реальной поверхности детали, имеющей выпуклую, вогнутую или выпукло-вогнутую реальную форму, следует выбрать девять контрольных точек, произвольным образом расположенных на контролируемой поверхности (рис. 3.8), и определить их координаты (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, \dots, 9$, в некоторой заданной декартовой системе координат $Oxuz$. Единственным очевидным требованием к расположению контрольных точек является максимально возможное их удаление друг по отношению к другу (некомпактное расположение), поскольку в этом случае меньшее влияние на погрешность аппроксимации будут оказывать высокочастотные составляющие отклонений рассматриваемых точек. Первым шагом реализации алгоритма аналитического моделирования реальной поверхности по девяти точкам является проверка выполнения условия существования единственной поверхности второго порядка, одновременно проходящей через все девять выделенных контрольных точек. Если тождество (3.12) справедливо, то такая поверхность существует и для определения ее конкретного аналитического выражения может быть предложен следующий алгоритм решения поставленной задачи.

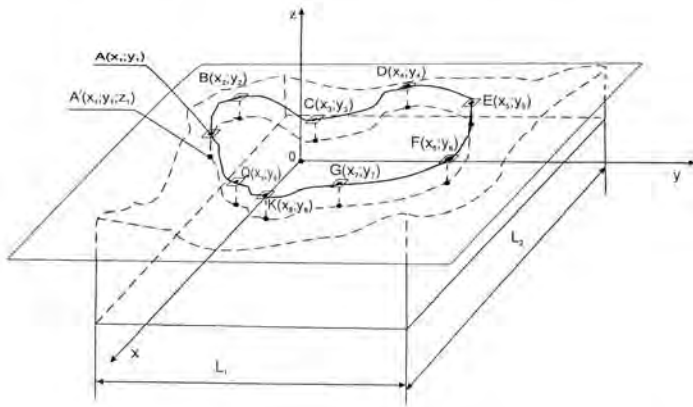


Рисунок 3.8 – Расположение контрольных точек при реализации метода «девять точек»

Пусть $M_k(x_k, y_k, z_k)$, $k = 1, 2, \dots, 9$, – девять точек, координаты которых удовлетворяют условию (3.12). Присоединяя к точкам M_k точку $M(x, y, z)$ с текущими координатами (x, y, z) , удовлетворяющими уравнению поверхности второго порядка (3.5), получим линейную однородную систему уравнений десятого порядка

$$\begin{cases} a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + \\ + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0 \\ a_{11}x_k^2 + a_{22}y_k^2 + a_{33}z_k^2 + 2a_{12}x_k y_k + 2a_{13}x_k z_k + \\ + 2a_{23}y_k z_k + 2a_{14}x_k + 2a_{24}y_k + 2a_{34}z_k + a_{44} = 0, \end{cases} \quad (3.42)$$

где $k = 1, 2, \dots, 9$.

Получаемый таким образом ненулевой набор-решение $(a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{44})$ системы уравнений (3.42) при подстановке его в аналитическое выражение (3.5) позволяет однозначно определить вид аппроксимирующей поверхности и ее конкретное уравнение, т.е. построить аналитическую модель реальной поверхности по минимальному количеству контрольных точек.

Для этого достаточно по полученному набору-решению найти значения так называемых инвариант поверхности, т.е. величин, не меняющихся при изменении системы координат, поскольку только инвариантные комбинации параметров (коэффициентов, показателей и т.д.), входящих в уравнение поверхности, характеризуют ее геометрические свойства, не зависящие от расположения поверхности относительно системы координат.

Инварианты общего уравнения поверхности 2-го порядка по отношению к группе ортогональных преобразований рассчитываются на основании следующих выражений [46]:

$$I_1 = a_{11} + a_{22} + a_{33}; I_2 = \begin{vmatrix} a_{11}a_{12} \\ a_{12}a_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11}a_{13} \\ a_{13}a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22}a_{23} \\ a_{23}a_{33} \end{vmatrix};$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} a_{11}a_{12}a_{13} \\ a_{12}a_{22}a_{23} \\ a_{13}a_{23}a_{33} \end{vmatrix}; I_4 = \begin{vmatrix} a_{11}a_{12}a_{13}a_{14} \\ a_{12}a_{22}a_{23}a_{24} \\ a_{13}a_{23}a_{33}a_{34} \\ a_{14}a_{24}a_{34}a_{44} \end{vmatrix}. \quad (3.43)$$

Введем также следующие коэффициенты:

$$K_1 = \begin{vmatrix} a_{11}a_{14} \\ a_{14}a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22}a_{24} \\ a_{24}a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{33}a_{34} \\ a_{34}a_{44} \end{vmatrix}; \quad (3.44)$$

$$K_2 = \begin{vmatrix} a_{11}a_{12}a_{14} \\ a_{12}a_{22}a_{24} \\ a_{14}a_{24}a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11}a_{13}a_{14} \\ a_{13}a_{33}a_{34} \\ a_{14}a_{34}a_{44} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22}a_{23}a_{24} \\ a_{23}a_{33}a_{34} \\ a_{24}a_{34}a_{44} \end{vmatrix}. \quad (3.45)$$

При известных значениях корней системы уравнений (3.42) a_{ij} ($i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$), инвариант (I_1, I_2, I_3, I_4) и коэффициентов (K_1, K_2), конкретный вид аппроксимирующей поверхности можно определить на основании критериев идентификации поверхностей, представленных в таблице 3.4. Используя эти же параметры, полученное уравнение аппроксимирующей поверхности второго порядка вида (3.5) можно легко привести к кано-

нической форме записи с помощью преобразований, описанных в работе [47].

Таблица 3.4 – Критерии идентификации аппроксимирующих поверхностей (определения моделей реальных поверхностей)

Вид аппроксимирующей поверхности	Критерий идентификации поверхности
Сфера	$I_2 > 0, I_1 \cdot I_3 > 0, I_4 < 0, a_{11} = a_{22} = a_{33}$
Эллипсоид	$I_2 > 0, I_1 \cdot I_3 > 0, I_4 < 0$
Однополостный гиперболоид	$I_2 \leq 0$ или $I_1 \cdot I_3 \leq 0, I_4 > 0$
Двуполостный гиперболоид	$I_2 \leq 0$ или $I_1 \cdot I_3 \leq 0, I_4 < 0$
Эллиптический параболоид	$I_4 < 0$
Гиперболический параболоид	$I_4 > 0$
Эллиптический цилиндр	$I_2 > 0, I_1 \cdot K_2 < 0$
Гиперболический цилиндр	$I_2 < 0, K_2 \neq 0$
Параболический цилиндр	$I_3 = 0, I_4 = 0, I_2 = 0, K_2 \neq 0$
Конус второй степени	$I_2 \leq 0$ или $I_1 \cdot I_3 \leq 0, I_4 = 0$
Плоскость	$K_1 = 0$

После построения аналитической модели реальной поверхности детали следующим этапом является определение для нее положения прилегающей плоскости и оценка отклонения от плоскостности, что в случае наличия конкретного канонического уравнения аппроксимирующей поверхности (гладкой теоретической поверхности второго порядка), проходящей через девять контрольных точек, представляет собой тривиальную задачу.

3.2.4 Анализ источников методических погрешностей измерений

Исходя из сущности разработанных методик координатных измерений отклонений формы номинально плоских поверхностей, основанных на аналитическом моделировании реальных поверхностей деталей, можно сделать вывод, что при их реализации методические погрешности будут возникать всякий раз из-за несоответствия реального объекта измерения (контролируемой поверхности) его идеализированной модели (аппроксимирующей поверхности), положенной в основу измерения. В

качестве исходных посылок для анализа источников методических погрешностей используем следующие положения.

1. Рассматриваемые поверхности имеют выпуклую, вогнутую или выпукло-вогнутую реальную форму и для каждой из них всегда можно выделить некоторую детерминированную низкочастотную составляющую и совокупность случайных высокочастотных составляющих отклонений точек, определяющих действительный рельеф исследуемой поверхности.

2. Низкочастотная составляющая отклонений точек в каждом конкретном случае полностью определяется некоторой средней поверхностью второго порядка $F_0(x, y, z)$ одной из тех, что представлены в таблице 3.1. Из всех средних поверхностей второго порядка наилучшую аппроксимацию обеспечивает поверхность, характеризующаяся наименьшим значением суммы квадратов или модулей отклонений по отношению к ней точек реальной поверхности. Таким образом, низкочастотная составляющая может быть описана аналитически уравнением средней аппроксимирующей поверхности второго порядка, определяемым на основании критерия глобального минимума суммы квадратов отклонений точек (наименьшего из всех локальных минимумов, свойственных рассматриваемым средним аппроксимирующим поверхностям).

3. Аппроксимирующие поверхности второго порядка $F(x, y, z)$, получаемые при аналитическом моделировании реальных поверхностей по минимальному количеству контрольных точек в процессе реализации разработанных методов измерения, отражают доминирующие низкочастотные составляющие, но отличаются от средних поверхностей второго порядка $F_0(x, y, z)$, удовлетворяющих условию наилучшей аппроксимации.

Сформулированные положения позволяют утверждать, что в качестве основных источников методических погрешностей следует рассматривать:

а) высокочастотные отклонения точек реальных поверхностей, «сглаживаемые» при их аппроксимации;

б) отличия аппроксимирующих поверхностей, используемых в качестве моделей реальных поверхностей деталей, от средних поверхностей второго порядка, удовлетворяющих условию наи-

лучшей аппроксимации, т.е. погрешности определения (аналитического описания) доминирующих низкочастотных составляющих отклонений точек (погрешности аппроксимации реальных поверхностей).

Механизм влияния на погрешности разработанных методов измерения высокочастотных отклонений точек реальных поверхностей заключается в следующем.

При замене реальных поверхностей деталей гладкими теоретическими поверхностями второго порядка, выступающими в качестве аппроксимирующих поверхностей, исключаются из рассмотрения высокочастотные составляющие отклонений точек, которые в комплексе с низкочастотной составляющей составляют макрогеометрию контролируемых поверхностей. Получаемые на основе таких моделей значения отклонений формы реальных поверхностей (действительные значения) Δ_r всегда будут отличаться от истинных значений Δ_t на величину, пропорциональную размаху R высокочастотных отклонений точек (рис. 3.9).

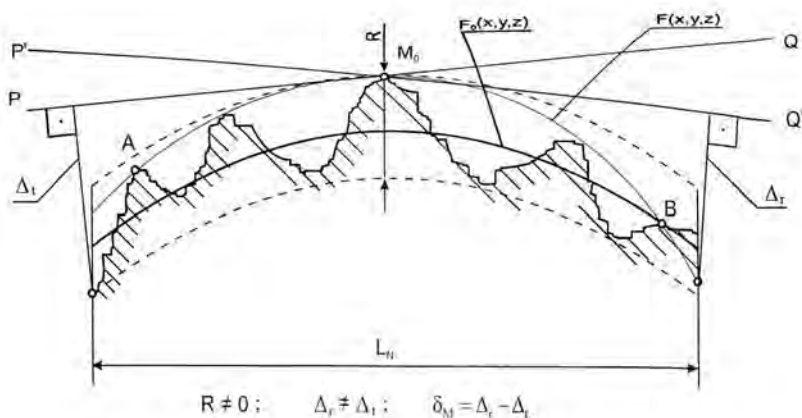


Рисунок 3.9 – Влияние высокочастотных отклонений точек реальной поверхности на методические погрешности

Следовательно, чем больше этот размах, тем большую методическую погрешность Δ_M будет вызывать рассматриваемый источник, поскольку

$$\Delta_M = \Delta_r - \Delta_t, \quad (3.46)$$

где $\Delta_r = f(R)$.

Очевидно, что степень влияния данного источника на методическую погрешность не зависит от используемого метода измерения («четырёх», «семи» или «девяти точек»), а всецело определяется значением параметра R .

Можно утверждать, что одним из факторов, влияющих на погрешности разработанных методов измерения, является так называемый R -фактор.

В отличие от рассмотренного, второй выделенный источник – погрешность определения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек или погрешность аппроксимации реальной поверхности относится к категории комплексных, и его можно рассматривать как результат совместного действия ряда более простых источников методических погрешностей. Исходя из особенностей аналитического моделирования реальных поверхностей деталей по минимальному количеству контрольных точек, в качестве основных источников погрешности определения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек можно выделить следующие:

- а) высокочастотные отклонения точек реальной поверхности;
- б) погрешности аппроксимации отдельных рассматриваемых профилей нормальных сечений реальной поверхности;
- в) отклонение расположения контролируемой поверхности.

В данном случае высокочастотные отклонения точек реальной поверхности рассматриваются с позиции возможного искажения низкочастотной составляющей при ее определении по минимальному количеству контрольных точек. Этот источник будет оказывать различное влияние на погрешности определения доминирующей низкочастотной составляющей по четырем, семи и девяти контрольным точкам, поскольку в основе каждого из рассмотренных вариантов лежит свой специфический алго-

ритм нахождения аппроксимирующей поверхности, адекватно заменяющей реальную поверхность в соответствии с поставленной измерительной задачей. Если проанализировать механизм влияния высокочастотных отклонений точек реальной поверхности на исследуемую погрешность δ_{\max} , то можно сделать вывод, что независимо от выбранного метода аппроксимации точность определения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек зависит от трех основных влияющих факторов. Такими доминирующими влияющими факторами являются:

- размах R высокочастотных отклонений точек (R -фактор);
- расстояния L между соседними рассматриваемыми контрольными точками (L -фактор);
- вид аппроксимирующей поверхности $F(x, y, z)$ (F -фактор).

Очевидно, что степень искажения низкочастотной составляющей отклонений точек реальной поверхности при ее аппроксимации по минимальному количеству контрольных точек будет возрастать с увеличением размаха R высокочастотных отклонений точек и отличаться для разных видов используемых аппроксимирующих поверхностей $F_i(x, y, z)$ $i = 1, 2, \dots, 10$.

Степень влияния высокочастотных отклонений точек будет резко возрастать при уменьшении расстояния L между контрольными точками. В этом отношении близкое (компактное) расположение контрольных точек следует считать неблагоприятным и необходимо стремиться к тому, чтобы они были максимально удалены друг от друга.

Что касается погрешностей аппроксимации отдельных рассматриваемых профилей нормальных сечений реальных поверхностей, то этот источник искажения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек будет иметь место только при аппроксимации контролируемых поверхностей по четырем и семи контрольным точкам. Такой вывод вытекает из сущности разработанных методов измерения. Только при реализации методов «четырёх» и «семи точек» аппроксимирующие поверхности определяются по радиусам кривизны отдельных, соответствующим образом расположенных профилей нормаль-

ных сечений. При нахождении этих опорных тест-радиусов независимо от характера низкочастотной составляющей отклонений точек (вида средней аппроксимирующей поверхности второго порядка, удовлетворяющей условию наилучшей аппроксимации) рассматриваемые реальные профили всегда предполагается заменять дугами окружностей, определяемыми по минимальному количеству контрольных точек. Таким образом, в данном случае погрешности аппроксимации отдельных исследуемых реальных профилей необходимо рассматривать, исходя из условия их наилучшей аппроксимации (рис. 3.10).

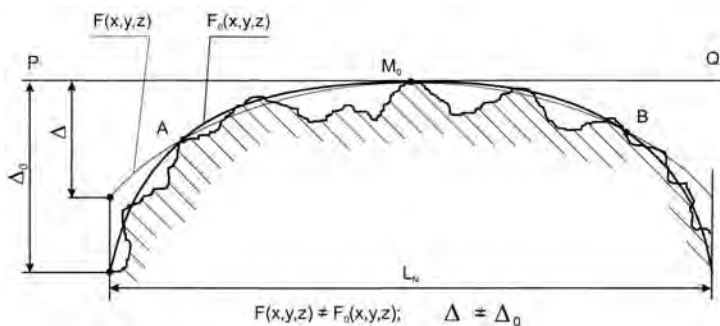


Рисунок 3.10 – Влияние погрешностей аппроксимации отдельных профилей нормальных сечений реальной поверхности на погрешности определения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек

Проведенный анализ рассматриваемого источника искажения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек реальной поверхности при ее аппроксимации по четырем и семи контрольным точкам позволяет утверждать, что независимо от выбранного метода аппроксимации погрешность определения низкочастотной составляющей здесь также как и в предыдущем случае будет зависеть от трех основных влияющих факторов:

- размаха R высокочастотных отклонений точек;
- расстояния L между соседними рассматриваемыми контрольными точками;

– характера доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек реальной поверхности (вида средней аппроксимирующей поверхности второго порядка $F_0(x, y, z)$, удовлетворяющей условию наилучшей аппроксимации).

Отклонение расположения контролируемой поверхности является специфическим источником методической погрешности, оказывающим влияние на погрешность определения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек только при аппроксимации реальной поверхности в случае реализации метода «четырёх точек». Это связано с тем, что только при аналитическом моделировании реальных поверхностей по четырем контрольным точкам не выделяются отклонения расположения контролируемых поверхностей, а условно принимается, что они равны нулю. Поскольку всякая реальная поверхность всегда имеет некоторое отклонение расположения, то в результате такой ее идеализации в процессе аналитического моделирования создается аппроксимирующая поверхность, характеризующаяся нулевым отклонением расположения. Все это неизбежно приводит к отличию полученной аппроксимирующей поверхности и средней аппроксимирующей поверхности второго порядка, удовлетворяющей условию наилучшей аппроксимации, т.е. дополнительной погрешности. Чем больше значение отклонения расположения контролируемой поверхности, тем больше погрешность ее аппроксимации. В отличие от других, данный источник погрешности метода «четырёх точек» характеризуется наиболее простым механизмом проявления, который легко может быть исследован аналитически (рис. 3.11).

Погрешность определения низкочастотной составляющей отклонений точек при аппроксимации реальной поверхности по четырем контрольным точкам, возникающая из-за отклонения расположения контролируемой поверхности, связана с двумя основными влияющими факторами:

- отклонением расположения Δ_{EP} контролируемой поверхности;
- расстоянием L между соседними рассматриваемыми контрольными точками, одна из которых базовая.

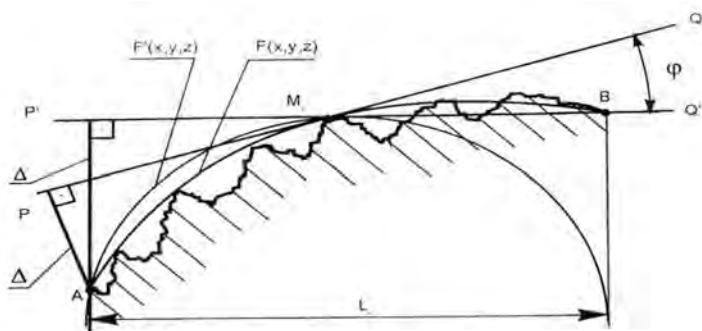


Рисунок 3.11 – Влияние отклонения расположения реальной поверхности на погрешность определения доминирующей низкочастотной составляющей отклонений точек

Очевидно, что степень искажения низкочастотной составляющей отклонений точек реальной поверхности в этом случае будет возрастать с увеличением ее отклонения расположения Δ_{EP} и расстояния L между контрольными точками, лежащими в одном нормальном сечении. Исходя из этого, для уменьшения влияния отклонения расположения контролируемой поверхности на погрешность метода «четырёх точек» это расстояние необходимо выбирать как можно меньше. С другой стороны, с уменьшением расстояния L , как было показано выше, будет возрастать влияние других источников методической погрешности. Учитывая это обстоятельство, можно рекомендовать располагать контрольные точки на максимально возможном удалении от базовой точки. Если при этом отклонения расположения контролируемых поверхностей будут вызывать неприемлемо большие погрешности, то вместо метода «четырёх точек» следует использовать более совершенные в этом отношении методы «семи» или «девяти точек», которые нечувствительны к рассматриваемому источнику методической погрешности. Проведенный анализ влияния отклонения расположения контролируемой поверхности на погрешность определения низкочастотной составляющей отклонений точек позволяет утверждать, что в список факторов, влияющих на методические погрешности

рассматриваемых методов, дополнительно к уже выделенным ранее факторам следует включить и так называемый *EP*-фактор (отклонение расположения поверхности).

3.3 Методика измерений номинально криволинейных поверхностей, представленных ограниченными участками

Опираясь на сформулированный принцип технологическо-метрологического соответствия можно разработать ряд оптимизированных методик для сложных поверхностей в частности «неполных» и имеющих элементы прерывания. [48-51]

Целью разработки методик измерения геометрических параметров неполных криволинейных поверхностей и поверхностей, представленных ограниченными участками, является определение минимально необходимое количество контрольных точек при их неравномерном расположении на профиле поперечного сечения.

Радиус-вектор реального профиля поперечного сечения цилиндрической или конической поверхности может быть описан выражением.

$$R(\varphi) = r + \sum_{k=2}^p x_k \cos(k\varphi + \psi_k) \quad (3.47)$$

Определим относительную погрешность измерения в данном сечении:

$$\delta = \frac{\Delta - \Delta^*}{\Delta} = 1 - \frac{\Delta^*}{\Delta}, \quad (3.48)$$

где $\Delta = 2x_k$ – теоретическое значение погрешности измерения,

Δ^* – максимальное значение погрешности для данного сечения, полученное в ходе измерения, определяемое как $\Delta^* = \max \Delta_{i,j} = \max |R_i - R_j|$, при $\varphi = const$ и $i \neq j$, где $R_j(\varphi) = R_0 + x_k \cos(k\varphi + \alpha_j)$.

Значение Δ определяется предельно допускаемыми значениями, указанными в нормативной документации, а Δ^* опреде-

ляется как сумма инструментальной и методической составляющих погрешности (принимая, что погрешность оператора и погрешность, возникающая из-за отклонения условий измерения от нормальных, пренебрежимо малы).

Выполняя определенные преобразования, получим

$$\begin{aligned} \Delta_{ij}^* &= x_k \left| \cos(k\varphi + \alpha_i) - \cos(k\varphi + \alpha_j) \right| = \\ &= 2x_k \left| \sin \frac{\alpha_i - \alpha_j}{2} \right| \left| \sin \left(k\varphi + \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2} \right) \right| \end{aligned} \quad (3.49)$$

Очевидно, что наибольшее значение Δ^* могут реализовывать только те величины Δ_{ij} амплитуда которых максимальна, т.е. когда

$$\left| \sin \frac{\alpha_i - \alpha_j}{2} \right| = 1, \quad (3.50)$$

что равносильно условию

$$\sin \frac{\alpha_i - \alpha_j}{2} = 1. \quad (3.51)$$

Это достигается для тех α_i и α_j , для которых разность $|\alpha_i - \alpha_j|$ достаточно близка к π .

Введем ряд условий:

1. Будем считать, что $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n$.
2. Точки α_{i+1} и α_i будем считать различными только в том случае, когда $\alpha_{i+1} - \alpha_i > \alpha^*$, где $\alpha^* = \frac{2\pi z}{360}$, z – угловой шаг измерения.

Подставляя в формулу (3.48) вместо α_j величину $\alpha_i + \pi$, получаем

$$\begin{aligned}\Delta^* &\leq \max \Delta_{ij} = 2x_k \max \left| \sin \left(k\varphi + \frac{2\alpha_i + \pi}{2} \right) \right| = \\ &= 2x_k \max |\cos k\varphi + \alpha_i|, i = 1, 2, \dots, n\end{aligned}\quad (3.52)$$

Рассмотрим n функций.

$$\left. \begin{aligned}\Delta_1^* &= 2x_k [\cos(k\varphi + \alpha_1)] \\ \Delta_2^* &= 2x_k [\cos(k\varphi + \alpha_2)] \\ \Delta_n^* &= 2x_k [\cos(k\varphi + \alpha_n)]\end{aligned} \right\} \quad (3.53)$$

Введем обозначение

$$\gamma_i(\varphi) = \left| \frac{\Delta_i^*}{\Delta} \right| = |\cos(k\varphi + \alpha_i)|, i = 1, \dots, n, \quad (3.54)$$

где γ_i — значение относительной погрешности в i -й точке.

Нас интересуют максимальные значения γ_i на i -м промежутке. В этом случае, кривая γ_i на i -м промежутке будет совпадать с $\Delta_{i \max}^*$ (рисунок 3.13).

Считаем, что функции $\gamma_i(\varphi)$ определены формулами (3.49) на всем множестве действительных чисел.

Функция $\gamma(\varphi) = \max\{\gamma_1(\varphi), \dots, \gamma_n(\varphi)\}$ имеет локальные макси-

мумы в точках вида $\frac{m\pi - \alpha_i}{k}, i = 1, \dots, n, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Число та-

ких точек на отрезке $\left[0, \frac{2\pi}{k} \right]$ не более $2n$. Обозначим точки ло-

кального максимума, попавшие в $\left[0, \frac{2\pi}{k} \right]$ символами t_1, \dots, t_{2n} ,

так, что $t_l \leq t_{l+1}, l = 1, \dots, 2n - 1$.

Глобальный максимум функция $\gamma(\varphi)$ принимает в точке $\frac{t_{2p} + t_{2p+1}}{2}$ такой, что $|t_{p+1} - t_p| = \max\{|t_{l+1} - t_l|\}$. Введем обозначение: $A = |t_{p+1} - t_p|$.

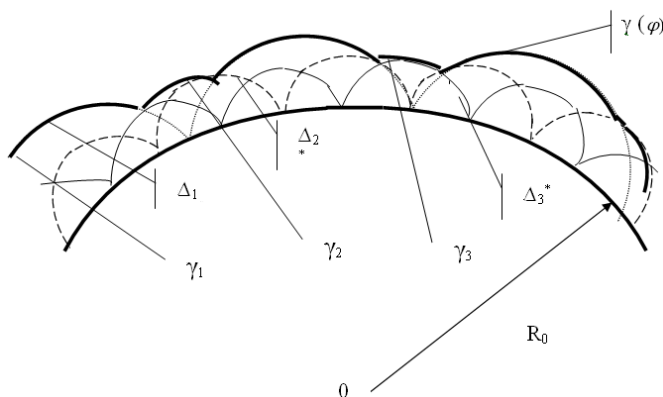


Рисунок 3.12 – Графики функций Δ_i , γ_i и $\gamma(\varphi)$

На рис. 3.13 представлен пример неравномерного расположения точек, т.к. имеет место «неполная» окружность, ограниченная сектором $\left[A, \frac{2\pi}{k}\right]$.

В данном случае на $\left[A, \frac{2\pi}{k}\right]$ расположены $2S$ точек с равномерным шагом (шаг α^*), начиная от точки $\frac{2\pi}{k}$. При этом дуга, ограниченная сектором $\left[A, \frac{2\pi}{k}\right]$ определяется как

$$A = \frac{2\pi}{k} - (2S - 1)\alpha^*. \quad (3.54)$$

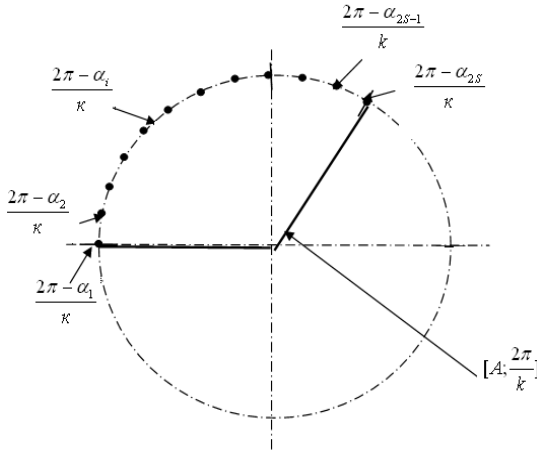


Рисунок 3.13 – Неравномерное расположение точек

Очевидно, что $\delta_{MAX} = 1 - \left| \cos \frac{A}{2} \right|$.

Поскольку $0 < a < A < \frac{\pi}{k}$, то соответственно $0 < k \frac{A}{2} < \frac{\pi}{2}$ и, следовательно, $\left| \cos k \frac{A}{2} \right| = \cos k \frac{A}{2}$, т.е.

$$\delta_{max} = 1 - \cos k \frac{A}{2}. \quad (3.55)$$

Определим уравнение, описывающее функцию $\delta(\varphi)$ на $[0, A]$.

$$\delta(\varphi) = \begin{cases} 1 - |\cos k \varphi| & \left\{ 0 \leq \varphi \leq \frac{A}{2} \right. \\ 1 - |\cos k(\varphi - A)| & \left. \frac{A}{2} \leq \varphi \leq A \right\} \end{cases} \quad (3.56)$$

Нас интересует именно этот интервал, т.к. значения $\delta(\varphi)$ на нем могут быть получены только косвенно (контрольные точки на $[0, A]$ отсутствуют). Таким образом, анализируя имеющуюся ин-

формацию о поведении функции $\delta(\varphi)$ на $\left[A, \frac{2\pi}{k}\right]$, мы должны с заданной вероятностью получить значения $\delta(\varphi)$ на $[0, A]$.

Для рассматриваемых углов φ косинусы положительны, поэтому

$$\begin{cases} 1 - |\cos k\varphi|, & 0 \leq \varphi \leq \frac{A}{2} \\ \delta(\varphi) = 1 - |\cos k(\varphi - A)|, & \frac{A}{2} \leq \varphi \leq A \end{cases} \quad (3.57)$$

Функция $\delta(\varphi)$ меняется на участке $[0, \delta_{\max}]$ немонотонно по закону, представленному графически на рисунке 3.14.

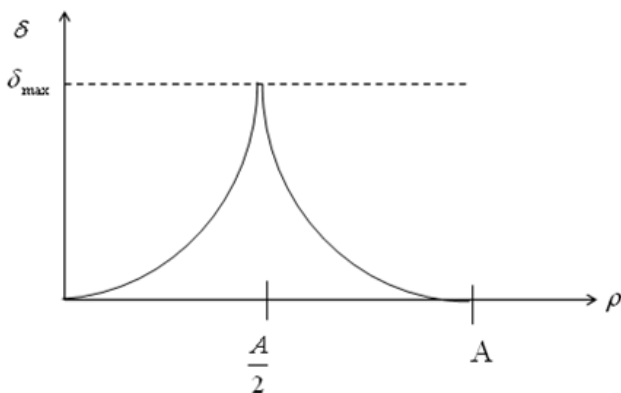


Рисунок 3.14 – График функции $\delta(\varphi)$

Плотность распределения случайной величины φ .

$$\begin{cases} f(\varphi) = \frac{1}{A}, & 0 < \varphi < \frac{A}{2} \\ 0, & \varphi \notin [0, A] \end{cases} \quad (3.58)$$

Найдем функцию распределения $G(\delta)$ случайной величины δ

$$G(\delta) = \frac{2}{Ak} \arccos(1 - \delta). \quad (3.59)$$

Плотность вероятности $g(\varphi)$ задается формулой

$$g(\delta) = G'(\delta) = \begin{cases} \frac{2}{Ak} \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - \delta)^2}}, & 0 < \delta < \delta_{\max} \\ 0 & \delta \notin [0, \delta_{\max}] \end{cases}. \quad (3.60)$$

Используя это, можно вычислить вероятность того, что относительная погрешность δ не превосходит некоторой допустимой величины $\delta_{\text{доп}}$:

$$P(\delta \leq \delta_{\text{доп}}) = \int_0^{\delta_{\text{доп}}} g(\delta) d\delta, \quad (3.61)$$

$$= \int_0^{\delta_{\text{доп}}} \frac{2}{kA} \frac{1}{\sqrt{1 - (1 - \delta)^2}} d\delta = \frac{2}{kA} \arccos(1 - \delta) \Big|_{\delta=0}^{\delta=\delta_{\text{доп}}}$$

$$P = \frac{2}{kA} \arccos(1 - \delta_{\text{доп}}). \quad (3.62)$$

Отсюда находим

$$A = \frac{2}{kP} \arccos(1 - \delta_{\text{доп}}). \quad (3.63)$$

Используя (3.54), находим число измерений $n = 2S$, обеспечивающее (с вероятностью P) относительную погрешность измерения, не превышающую допустимого значения.

$$\frac{2\pi}{k} - (2S - 1)a^* = \frac{2}{k\pi} \arccos(1 - \delta_{\text{доп}}). \quad (3.64)$$

Откуда

$$2S = 1 + \frac{2\pi}{ka^*} - \frac{2}{kP\alpha^*} \arccos(1 - \delta_{\text{доп}}). \quad (3.65)$$

Поскольку $a = \frac{2\pi\alpha}{360k}$, то

$$n = 2S = 1 + \frac{360}{z} \left(1 - \frac{2}{\pi P} \arccos(1 - \delta_{\text{доп}})\right) \quad (3.66)$$

Таким образом, количество контрольных точек определяется требуемой точностью, угловым шагом и заданной вероятностью.

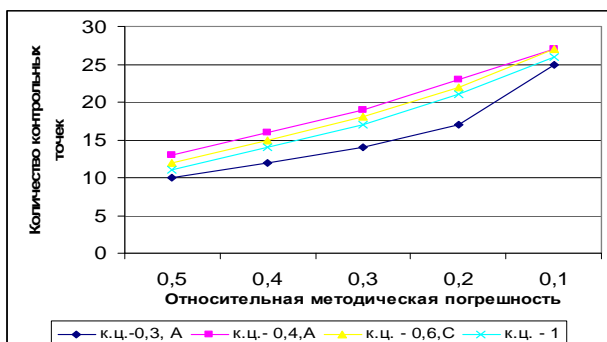
Результаты расчета количества контрольных точек представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные значения минимально необходимого числа контрольных точек

P	[д]				
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
n					
0,99	13	16	19	23	27
0,95	12	15	18	22	27
0,9	11	14	17*	21	26
0,8	7	11	15	19	25
0,7	3	7	12	17	23
0,6	3	3	7	13	20
0,5	3	3	3	7	17

*- выделенный диапазон представляет собой предпочтительные значения

Расчетные значения минимально необходимого числа контрольных точек, полученные при использовании различных методик, приведены на рис. 3.15.

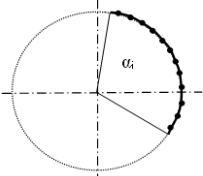
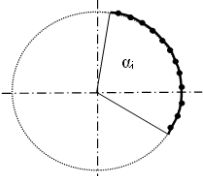
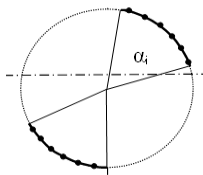
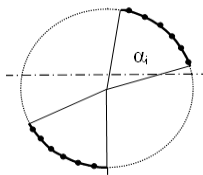
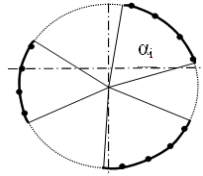
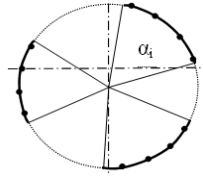
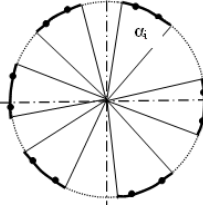


к.ц. – коэффициент целостности

Рисунок 3.15 – Сопоставление минимально необходимого числа контрольных точек, полученных при использовании МКВИ для разных видов поверхности

Для удобства проектирования МКВИ введем следующую классификацию (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Классификационная схема поверхностей, имеющих элементы прерывания (1 – условное обозначение поверхности, 2 – количество участков, 3 – угловой диапазон участка (α_i), 4 – коэффициент целостности (ζ), 5 – вид расположения контрольных точек («-» неравномерное, «+» равномерное)

1	Графическое изображение поверхности	Классификационные признаки			
		2	3	4	5
A1		1	80-200€	0,22-0,56	-
A2		1	200-360€	0,56-1	+
B1		2	40-100€	0,22-0,56	-
B2		2	100-180€	0,56-1	+
C1		3	30-70€	0,25-0,58	-
C2		3	70-120€	0,58-1	+
D		Больше или равно 4	-	-	+

В качестве критерия классификации контролируемых поверхностей (профилей) используем коэффициент целостности ξ , [52-53] который рассчитывается как отношение углового диапазона измеряемой поверхности к угловому диапазону полной окружности, т.е.

$$\xi = \frac{\alpha_i}{360^\circ}. \quad (3.67)$$

При неизменных значениях z и P , выражение (3.66) может быть представлено в виде

$$n = f(\arccos(1 - \delta_{\text{дон}})). \quad (3.68)$$

Как было сказано ранее, для «идеальной» окружности достаточно трех точек для определения радиуса и координат центра. Чем ближе реальный профиль поперечного сечения к такой окружности, тем меньше точек необходимо для однозначного определения его параметров.

Однако всегда существуют объективные причины, из-за которых и возникают различия между реальными элементами детали и номинальными, заданными чертежом. К ним относятся, во-первых, многочисленные источники изменчивости в технологическом процессе, которые имеют стабильное и повторяемое распределение во времени; во-вторых, факторы, которые воздействуют на процесс нерегулярно.

Таким образом, очевидно, что между необходимым количеством контрольных точек и качеством технологического процесса есть корреляционная связь.

В случаях, когда на выходе процесса показатели качества измеряют по количественному признаку и они заданы предельными значениями (границами поля допуска), соответствие процесса установленным требованиям, т.е. его качество, можно оценить с помощью специальных показателей. Эти показатели определяют потенциальные и фактические возможности удовлетворять заданным требованиям при стабильном процессе и про-

цессе, стабильность которого не подтверждена, при точной и смещенной настройке процесса [54].

Предварительная оценка стабильности процесса осуществляется с использованием контрольных карт Шухарта. Результатом оценки стабильности является вывод о соответствии процесса одному из следующих состояний:

- состояние А (процесс стабилен и по разбросу и по положению среднего арифметического);
- состояние Б (процесс стабилен и по разбросу, но нестабилен по положению среднего арифметического);
- состояние В (процесс нестабилен по разбросу).

Для оценки возможностей процесса используют следующие показатели.

1. Собственная изменчивость процесса σ_R – это часть изменчивость процесса, зависящая от влияния только обычных причин, рассчитывается по формулам:

$$\sigma_R = \frac{\bar{R}}{d_2}, \quad (3.69)$$

либо

$$\sigma_R = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (3.70)$$

где \bar{R} – среднее значение R_i (размаха i -й выборки);

d_2 – коэффициент, зависящий от числа значений в каждой i -й выборке;

\bar{S} – среднее значение средних квадратических отклонений отдельных выборок;

c_4 – коэффициент, зависящий от числа значений в каждой i -й выборке.

2. Полная изменчивость процесса σ_X – это изменчивость процесса, зависящая от влияния как обычных, так и особых причин.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}, \quad (3.71)$$

где N – суммарный объем данных по всем выборкам;

X_i – результат измерений отдельных единиц продукции, $i = 1, \dots, N$.

\bar{X} – среднее арифметическое всех значений в объединенной выборке.

Для оценки статистической управляемости технологического процесса рассматривают разность между C_p и P_p . Если она не более 12 % от значения C_p , то принимается решение о том, что процесс статистически управляемый.

3. Индекс воспроизводимости C_p

$$C_p = \frac{IT}{6\sigma_R}. \quad (3.72)$$

4. Индекс пригодности P_p

$$P_p = \frac{IT}{6\sigma_x}. \quad (3.73)$$

При $C_p \geq 1,33$ - считается, что процесс находится в отличном состоянии, имеется необходимый гарантированный запас, поле допуска перекрывается на 75 %.

$C_p = 1$ – является наименьшим приемлемым значением этого коэффициента.

При $1,33 > C_p \geq 1$ – процесс находится в удовлетворительном состоянии.

Соответственно при $C_p < 1$ процесс находится в неудовлетворительном состоянии.

В результате формулу (3.62) можно уточнить следующим образом:

$$n_1 = \kappa_1 n, \quad (3.74)$$

где κ_1 – коэффициент для расчета оптимального количества контрольных точек при измерении ограниченных участков номинально криволинейной поверхности с учетом коэффициента

воспроизводимости технологического процесса, который рассчитывается по формуле:

$$\kappa_1 = \frac{\arccos(1 - \delta^*)}{\arccos(1 - \delta_{\text{доп}})}, \quad (3.75)$$

где $\delta_{\text{доп}}$ – допустимое значение относительной методической погрешности;

δ^* – полученное значение относительной методической погрешности.

Исследования множества различных технологических процессов позволили получить зависимость между коэффициентами C_p и κ_1 (рис. 3.16).

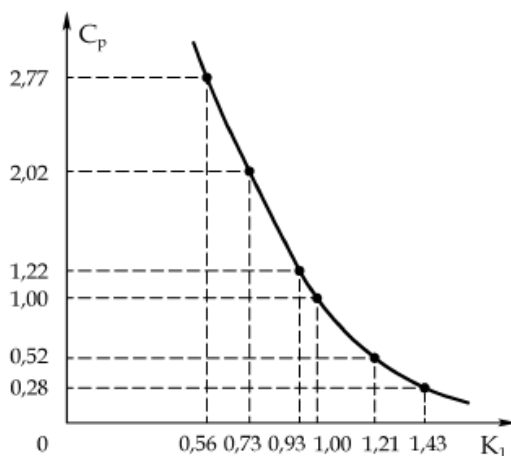


Рисунок 3.16 – Зависимость между коэффициентами C_p и κ_1

3.4 Критерии адекватности метрологических моделей объектов контроля

Адекватность метрологических моделей объектов контроля является их свойством, отражающим близость моделей к моделируемым объектам. Принимая во внимание, что любая модель

является в той или иной степени редуцированной по отношению к реальному объекту, целесообразно рассматривать оценки адекватности моделей применительно к конкретному свойству реального объекта, которое требовалось воспроизвести на модели. Применительно к координатному контролю геометрических параметров деталей такими свойствами являются параметры геометрии их поверхностей, то есть соответствующие метрологические модели должны хорошо воспроизводить эти геометрические параметры [55].

В математике широко используются оценки точности приближения в среднеквадратичной и минимаксной метриках. Воспользуемся этими оценками и дополним их параметрами результативности моделей с целью использования в качестве оценок адекватности. В качестве параметров результативности будем рассматривать соотношение точности приближения с допуском на измеряемый параметр и число контрольных точек.

Точность приближения в среднеквадратичной метрике определяется дискретно выражением вида

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i - z_i^*)^2}{N}}, \quad (3.76)$$

где N – число контрольных точек, используемых для построения модели, z_i^j – координата i -той точки модели, z_i^* – координата i -й точки по результатам измерения исходной поверхности.

В рассматриваемой оценке учтено число контрольных точек, что позволяет использовать эти оценки для сравнения «выигрыша» в адекватности моделей при применении различного числа контрольных точек.

В случае, если производится имитационное моделирование с целью экспериментальной валидации разработанных методов моделирования целесообразно строить непрерывные оценки. В этом случае оценка (3.38) примет следующий вид:

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{\iint [z(x, y) - z^*(x, y)]^2 dx dy}{\iint z(x, y) dx dy}} \quad (3.77)$$

где $z(x, y)$ – моделируемая теоретическая поверхность, $z^*(x, y)$ – аппроксимирующая модель поверхности.

Соотнося оценки (3.68) и (3.69) с допуском получим более информативные оценки

$$\rho_1 = \frac{1}{IT} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (z_i^*)^2}{N}} \quad (3.78)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{IT} \sqrt{\frac{\iint [z(x, y) - z^*(x, y)]^2 dx dy}{\iint z(x, y) dx dy}} \quad (3.79)$$

Оценки на основе среднеквадратичной метрики являются предпочтительными, поскольку они позволяют получить усредненный показатель погрешности аппроксимации на всей площади моделируемой поверхности. Учитывая, что поверхности деталей согласно постулату гладкости свободны от резких всплесков, такие оценки можно считать вполне информативными. Однако для обеспечения полноты анализа адекватности рассмотрим также оценки на основе средней метрики:

$$\mathcal{G}_1 = \max\{|z_i - z_i^*|\}; \quad \mu = \frac{1}{IT} \max\{|z_i - z_i^*|\}, \quad (3.80)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_2 &= \max\{|z(x, y) - z^*(x, y)|\}; \\ \mu &= \frac{1}{IT} \max\{|z(x, y) - z^*(x, y)|\} \end{aligned} \quad (3.81)$$

Рассматриваемые оценки адекватности метрологических моделей позволят выбирать лучшую методику моделирования из нескольких конкурирующих либо производить экспериментальную верификацию моделей на основе имитационного моделирования.

ГЛАВА 4

НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПОЛЕЙ ДОПУСКОВ

4.1. Сравнительный анализ вариантов интерпретации предельных размеров в ходе координатного контроля

Стандарт ИСО 8015 представляет варианты возможной интерпретации предельных размеров, построенные на двух существенно различающихся подходах. В основу одной интерпретации положены принципы Тейлора, в основу другой – минимаксный принцип. Фактически стандарт определяет построение предельных контуров элемента детали, называя их интерпретацией предельных размеров. Предельные размеры есть установленные разработчиком (обычно стандартные) нормы, с которыми сопоставляют полученные при измерительном контроле значения экстремальных параметров реального элемента. Термин «интерпретация предельных размеров» неудачен, поскольку его истолкование в стандарте не различает нормы, характеризующие нормативную модель, и параметры реального элемента (характеристики реального объекта, представляемые экспериментальной моделью). Далее в тексте использован общепринятый стандартный термин, если это не мешает рассмотрению сути процесса контроля.

В случае интерпретации предельных размеров на основе минимаксного принципа всякий реальный элемент детали имеет два определяющих размера, по которым оценивается его годность:

- наибольший размер, определяемый как максимальная толщина охватываемого элемента (вала) или максимальная ширина охватываемого элемента (отверстия), полученный путем измерения реального элемента по двухточечной схеме;
- наименьший размер, определяемый как минимальная толщина охватываемого элемента (вала) или минимальная ширина

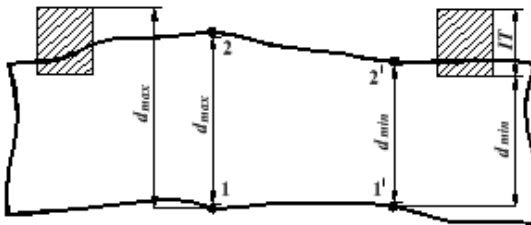
охватывающего элемента или (отверстия), также полученный путем измерения реального элемента по двухточечной схеме.

При контроле годности элемента в этом случае определяющие размеры контролируемого элемента сопоставляют с его предельными размерами, которые заданы на чертеже детали (например, указанием номинального размера и поля допуска). Большой из определяющих размеров сопоставляют с наибольшим предельным размером, а меньший – с наименьшим.

На рисунке 4.1 представлена графическая интерпретация минимаксной оценки размеров реального элемента наружной номинально цилиндрической поверхности, где они обозначены соответственно как d_{\max} и d_{\min} , а предельные размеры как d_{\max} и d_{\min} . Реальный элемент детали будет считаться годным, если оба его определяющих размера не выходят за пределы, ограниченные наименьшим и наибольшим предельными размерами.

В соответствии с этим, условие годности, представленной на рис. 4.1 наружной поверхности аналитически можно описать следующим образом:

$$d_{r \max} \leq d_{\max},$$
$$d_{r \min} \geq d_{\min}.$$



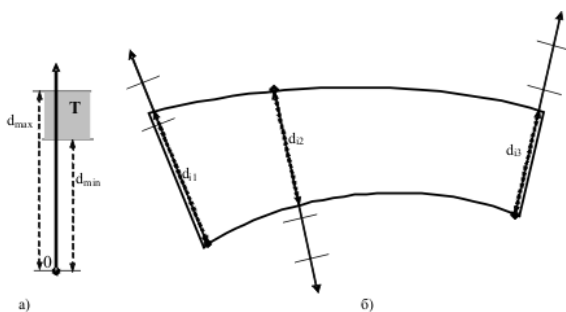
Условие годности: $d_{r \max} \leq d_{\max}$; $d_{r \min} \geq d_{\min}$

Рисунок 4.1 – Интерпретация предельных размеров на основе минимаксного принципа

Поле допуска имеет чисто формальный характер, его можно охарактеризовать как интервал между двумя числами d_{\max} и d_{\min} .

Графическая интерпретация поля допуска представляет собой бесконечное множество отрезков прямой линии одинаковой длины ($T = d_{\max} - d_{\min}$), расположенных на плавающих осях независимых однокоординатных систем. Каждая из этих осей «привязана» к конкретному контрольному сечению реального элемента d_{r_i} по направлению, а начало координат помещают в одну из конечных точек реального размера.

Интерпретация предельных размеров на основе принципов Тейлора также включает два определяющих размера реального элемента детали, по которым при контроле оценивается его годность (рис. 4.2):



а) модель поля допуска для любого размера;
 б) «плавающие» поля допусков конкретных контрольных сечений

Рисунок 4.2. – К интерпретации предельных размеров
 (элемент бракованный по d_{i2} и d_{i3})

1) «максимум материала детали» или размер элемента идеальной геометрической формы, прилегающего к рассматриваемому реальному элементу детали, наибольший для наружного охватываемого элемента (вала) или наименьший для внутреннего охватываемого элемента (отверстия). Этот размер сопоставляют с соответствующим нормативным размером – «пределом максимума материала».

2) «минимум материала детали» или размер, определяемый соответственно как минимальная толщина охватываемого реального элемента (вала) или максимальная ширина охватываю-

щего реального элемента (отверстия), полученная путем его измерения по двухточечной схеме. Этот размер сопоставляют с соответствующим нормативным размером – «пределом минимума материала».

При контроле годности охватываемого элемента (вала) больший из определяющих размеров сопоставляют с пределом максимума материала элемента (наибольшим предельным размером вала), а меньший – с пределом минимума материала элемента (наименьшим предельным размером вала). Предельные размеры определяют в соответствии с заданным на чертеже детали размером и полем допуска размера контролируемого элемента. Истолкование предельных размеров вала по Тейлору, принятое в международных и национальных стандартах, дает достаточно сложную модель: прилегающий к поверхности реального вала геометрически правильный цилиндр не должен превышать заданного (наибольшего предельного) размера, а толщина реальной поверхности вала в любом сечении не должна быть меньше второго заданного (наименьшего предельного) размера. Следовательно, нормативная модель наружной цилиндрической поверхности (рис. 4.3) включает в себя один цилиндр наибольшего предельного размера d_{\max} и бесконечное множество цилиндров меньших размеров, фрагменты которых могут произвольным образом располагаться внутри большего цилиндра.

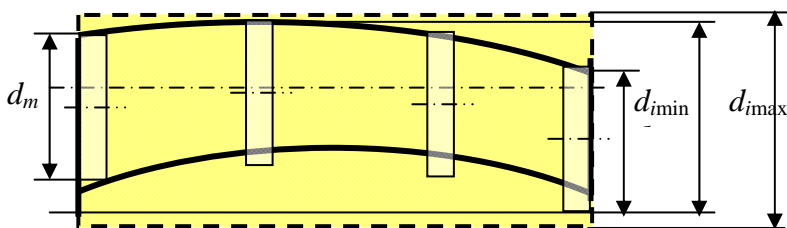


Рисунок 4.3 – Оценка годности номинально цилиндрической поверхности

Условия годности реальной цилиндрической поверхности:

$$d_{imin} \geq d_{min} \text{ и } d_{imax} \leq d_{max},$$

где d_{imin} и d_{imax} – наименьший и наибольший действительные размеры, полученные при измерении реальной поверхности;

d_{min} и d_{max} – наименьший и наибольший предельные размеры поверхности.

Реальный элемент детали будет считаться годным, если его определяющие размеры будут находиться между нормированными пределом максимума и пределом минимума материала. Для рассматриваемой в качестве примера наружной номинально цилиндрической поверхности условия годности аналитически можно выразить следующим образом

$$d_{rmax} \leq d_{max},$$

$$d_{rmin} \geq d_{min}.$$

Измеряя два значения размера элемента детали, одновременно контролируют отклонения формы в диаметральном выражении: разность размеров максимума и минимума материала реального элемента зависит от отклонений формы. Уровень относительной геометрической точности элемента определяет стандарт [56], который устанавливает три рекомендуемых варианта нормирования его значения. Допуск формы (или расположения) в процентах от допуска размера составляет примерно 60 % для уровня нормальной геометрической точности *A*, 40 % для уровня повышенной точности *B* и 25 % для уровня высокой точности *C*. Таким образом, реализация принципов Тейлора позволила решить проблему улучшения качества деталей путем повышения точности формы поверхностей элементов.

Однако принципы Тейлора не вполне учитывают функциональное назначение поверхностей, образующих размер. Если они обеспечивают определенные преимущества для сопряжений с зазором, то образование натягов между поверхностями деталей при такой трактовке годности нельзя признать удачным. Наибольший размер вала, образующий натяг в сопряжении, может оказаться характеристикой одного сечения в продольном

или поперечном направлениях, что не может обеспечить стабильного значения натяга.

Принципы Тейлора логически не распространяются на размеры, определяющие расположение геометрических элементов деталей (цилиндрических, призматических и т.п.), включая положение элементов относительно баз.

Контроль с помощью калибров в тейлоровском смысле нельзя считать вполне строгим. Однозначно адекватна лишь проверка комплексным проходным калибром, реализующим прилегающую поверхность. Проверка элементарным непроходным калибром (для гладкого охватываемого цилиндра это будет скоба) для обеспечения строгого соответствия требует бесконечного числа пробных сопряжений, чтобы убедиться, что калибр не проходит ни в одном месте. Поскольку это требование на практике нереализуемо, ограничиваются конечным, обычно небольшим числом пробных сопряжений, полагаясь на так называемый «постулат гладкости» [57].

Суть его заключается в предположении, что любая регулярная технология накладывает более или менее жесткие связи на взаимное расположение близких точек обрабатываемой поверхности. Поэтому проверка размера одного участка позволяет с некоторой вероятностью судить и о размерах соседних участков. Чем теснее эта корреляционная связь, тем с большим основанием можно судить о качестве всей поверхности детали по результатам контроля лишь в нескольких ее точках (сечениях). Такой подход оправдывает многочисленные отступления от принципов Тейлора, допускаемые при контроле реальными калибрами, а также при контроле универсальными средствами измерений с «точечными» контактными элементами.

При контроле непроходного размера охватываемого цилиндра показывающим универсальным прибором (например, нутромером индикаторным), максимальный результат при измерении в ряде сечений, сравнивают с наибольшим предельным значением размера. При этом настройка на диаметрально плоскую поверхность обеспечивается узлом центрирования, а идентификация линии измерения, нормальной к образующим, достигается

поиском экстремума при покачивании прибора в диаметральной плоскости.

Получаемые при многокоординатных измерениях значения координат отдельных точек не всегда могут быть непосредственно сопоставлены с предельными контурами детали, материализуемыми калибрами, например, с размерами цилиндра и отрезка прямой. Если принять аналогию с контролем нутромером, то с предельным непроходным размером отверстия сопоставляют расстояние между парами реальных или расчетных точек полученных в результате измерений координат точек. Однако такую пару точек при измерении следует располагать строго определенным образом относительно оси отверстия, в то время как положение оси неизвестно и подлежит определению.

Не менее сложна задача контроля по проходному предельному размеру. Если пытаться имитировать контроль проходным калибром, то при буквальном истолковании требований стандарта следовало бы измерить координаты большой совокупности точек поверхности, аналитически вписать в нее прилегающий цилиндр, рассчитать диаметр и сопоставить его с предельным размером. Даже с учетом постулата гладкости решение такой задачи требует большого числа контрольных точек и под силу только координатному прибору, снабженному компьютером.

Проведенный анализ двух вариантов интерпретации предельных размеров позволяет сделать вывод о возможности получения противоречивых результатов контроля размеров элементов. Один и тот же элемент детали, признанный годным на основе минимаксного принципа контроля, может оказаться бракованным при его контроле на основе принципов Тейлора. Это наглядно демонстрируют схемы контрольных сечений наружной номинально цилиндрической поверхности, представленные на рисунках 4.3, 4.4. При равенстве размеров d_{\min} и d_{\min} размеры d_{\max} и d_{\max} могут существенно отличаться, например, из-за наличия отклонения от прямолинейности оси у контролируемой поверхности, которое не выявляется при контроле размера этой поверхности на основе минимаксного принципа.

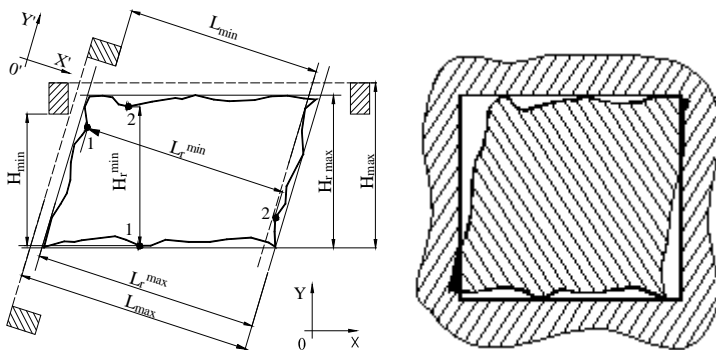
При контроле размеров деталей на основе рассмотренных вариантов интерпретации предельных размеров, определяющих

суть традиционного подхода к контролю, каждый элемент детали измеряется автономно, в своей системе координат и ограничивается своим полем допуска, не связанным с полем допусков других элементов.

Один из возможных путей обхода подобных нестыковок может базироваться на использовании понятия средней поверхности, численно определяемой по результатам измерения достаточного множества контрольных точек с использованием многокоординатных средств. Например, определив в пространстве координат средства измерения положение (направление оси) и диаметр d_m среднего цилиндра, можно найти соосные ему максимальный и минимальный цилиндры, охватывающие все размерное поле реальной детали, и сравнить диаметры этих цилиндров с предельно допустимыми (рис. 4.3, а). Однако такая трактовка не совпадает с принципами Тейлора как по проходной, так и по непроходной границе. В то же время она понимается вполне определенно, однозначно, и в ряде случаев допускаемые при этой трактовке отступления от принципа Тейлора могут оказаться практически несущественными для функционирования детали.

Таким образом, хотя в принципе координатные измерения позволяют более или менее адекватно реализовать принцип Тейлора путем имитации контроля с помощью калибров, это вряд ли целесообразно для ряда случаев. Более рационален иной путь, связанный с комплексным контролем по всем искусственно разделённым геометрическим параметрам.

Контроль по разделённым геометрическим параметрам приводит к появлению в результатах измерений неисключенных методических погрешностей систематического характера из-за несовпадения систем координат, в которых измеряются параметры различных элементов. В итоге некоторые функционально годные детали могут быть ошибочно отнесены к группе бракованных деталей и наоборот, что приведет к увеличению количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей. При таком подходе к контролю не исключена ситуация, когда деталь, формально признанная годной, может оказаться функционально бракованной при ее установке в сборочную единицу (рис. 4.4, а, б).



Условия годности: $L_r^{\max} \leq L_{\max}; L_r^{\min} \geq L_{\min}$
 $H_r^{\max} \leq H_{\max}; H_r^{\min} \geq H_{\min}$

Рисунок 4.4 – Автономный контроль размеров детали на основе принципов Тейлора

В работе [57] представлена методика выполнения измерений размеров деталей, применение которой позволяет сократить методические погрешности, следовательно, повысить качество их контроля. Основу методологии таких измерений составляет понятие «размер детали». Размеры детали предлагается делить на два основных типа: координирующие и элементные размеры. Координирующие размеры отвечают за положение геометрических элементов детали (цилиндрических, призматических и др.) относительно баз; а размеры элементов деталей (элементные размеры) определяют пространственную форму и габаритные размеры элементов. Согласно [57] предложено общее решение проблемы на основе теории базирования. Суть решения заключается в следующем.

Размеры деталей – это размеры геометрических элементов, выполняющих в детали определенное служебное назначение: основных или вспомогательных конструкторских баз, исполнительных или несопрягаемых поверхностей.

Основные конструкторские базы, определяющие положение детали в сборочной единице, материализуют обобщенную систему координат детали. Поскольку деталь располагается в пространстве, то обобщенная система координат позволяет однозначно определить положение детали в сборочной единице за счет лишения де-

тали всех шести степеней свободы – трех поступательных (линейных) и трех вращательных (угловых). Согласно теории базирования обобщенную систему координат детали образует комплект трех «точечных» баз, не лежащих в одной плоскости или на одной прямой. Информативность каждой из применяемых в машиностроении и приборостроении баз равна или больше трех. Здесь под информативностью (I) будем понимать максимальное число лишаемых базой степеней свободы W детали. Для плоской детали $I = 3$ (одно линейное перемещение и два угловых), для конической детали $I = 5$ (три линейных перемещения и два угловых), для цилиндрической детали $I = 4$ (два линейных перемещения и два угловых), для сферической детали $I = 3$ (три линейных перемещения). Поэтому только одна из трех баз комплекта может полностью истратить свои информационные возможности на образование системы координат детали, у двух других баз они не могут быть использованы. Так для пространственной декартовой системы координат (установочная база + направляющая база + опорная база), использованы шесть из всех потенциально возможных степеней свободы. Для установочной базы – три перемещения, для направляющей – два перемещения, для опорной базы – одно линейное перемещение. Поскольку суммарная информативность комплекта вспомогательных баз равна шести, то число и вид координирующих размеров каждой вспомогательной базы определяется информативностью базы рассматриваемого элемента.

Если оси вспомогательной системы координат повернуты относительно осей обобщенной системы координат на любой номинальный угол кроме нуля, то линейные координирующие размеры вспомогательных баз относительно основных баз являются одномерными координатами.

Все это приводит к отклонению положения элементов деталей и оказывает влияние на размеры элемента так же, как и отклонения формы поверхностей, образующих элементный размер. Элементные размеры образуют посадки между присоединяемыми деталями. Характер посадок в значительной степени зависит от отклонений формы поверхностей элементов. Если предположить, что отклонения формы поверхностей элементов близки к нулю, то отклонения расположения будут искажать пространственную гео-

метрию элемента детали и влиять на размеры элемента так же, как и отклонения формы поверхностей, образующих элементный размер.

В.И. Глухов предлагает более общий принцип двумерности линейных размеров деталей: размер длины любого элемента реальной детали имеет два граничных значения – размер максимума материала элемента детали (наибольший для вала и наименьший для отверстия) и размер минимума материала (наименьший для вала и наибольший для отверстия). Граничные значения определяются как размеры двух правильных элементов, номинально расположенных относительно баз детали и касательных реальным поверхностям элемента: один – вне материала детали, второй – в материале детали. При этом исходными положениями методологии являются:

- действительные значения размеров должны устанавливаться измерением с допустимой погрешностью на основе достоверных определений, учитывающих служебное назначение каждого элемента детали;

- методики выполнения измерений должны обеспечивать единство измерений всех действительных значений каждого из размеров деталей в соответствии с содержанием их понятий независимо от применяемых методов, способов, видов измерений и используемых средств измерений;

- основу методики выполнения измерений составляет схема измерения, отражающая все действительные значения измеряемого размера на геометрической модели детали, устройство базирования, средства измерения и приемы их использования;

- измерительными базами при измерении координирующих размеров должны быть, в соответствии с принципом единства баз, основные или вспомогательные конструкторские базы, материализующие обобщенную систему координат детали, а при измерении элементных размеров – комплект баз, в составе которого измеряемый элемент выполняет свое служебное назначение;

- условия передачи прибору размера меры при настройке должны быть такими же, как при эксплуатации детали;

- движения детали при измерении должны, согласно принципу инверсии, быть такими же, как и при эксплуатации детали в машине или сборочной единице;

- при аттестации методик выполнения измерений методическая погрешность должна включаться в суммарную погрешность измерения.

Основной составляющей методической погрешности является погрешность схемы измерения, т.е. разность между измеряемыми по схеме значениями размеров и соответствующими значениями размеров по их определениям в соответствии с принципом двумерности размеров.

Предлагаемая методология двумерных измерений позволяет повысить точность метода измерения, т.е. точность передачи размеров элемента детали измерительному прибору за счет уменьшения основной составляющей методической погрешности – погрешности схемы измерения – до величины второго порядка малости.

При большом разнообразии методик выполнения координатных измерений геометрических параметров деталей нет единых принципов, а также общей методологии проектирования методик и оценки возникающих методических погрешностей. Предлагаемые унифицированные методики выполнения координатных измерений обычно регламентируют представления результатов измерения в виде числовых значений, подразумевают выбор числа и местоположение точек измерения, последовательность их обхода, перечисляют составляющие погрешности измерения. Глухов В.И. предлагает разделить все составляющие погрешности измерения на две группы – группу методических погрешностей и группу инструментальных погрешностей.

Существующее в настоящее время методическое обеспечение координатного контроля геометрических параметров изделий базируется на традиционном подходе, в рамках которого можно выделить два ключевых аспекта.

Во-первых, методики выполнения измерений проектируются таким образом, чтобы предупредить погрешности метода, возможные при всех наихудших вариантах искажения размеров, формы и расположения элементов. При этом не используется априорная информация о характере искажений этих геометрических параметров реальных элементов деталей, которая может существовать или может быть получена на этапе проектирования конкретной методики.

Универсальность разрабатываемых по такой схеме методик неизбежно связана с их усложнением, что ухудшает экономичность

измерений в связи с необходимостью использовать более сложные средства измерений, неоправданно большое количество контрольных точек (сечений) при реализации методик, персонал высокой квалификации.

С другой стороны, необоснованное уменьшение количества контролируемых точек (сечений) может приводить к недостаточности измерительной информации для обеспечения адекватности получаемой экспериментальной модели реальному объекту измерения и как результат – неприемлемо большим методическим погрешностям измерений контролируемых параметров. Значит, необходима оптимизация методик координатных измерений по критерию обеспечения требуемой точности контроля при минимальном объеме измерительной информации о контролируемом объекте (минимальном количестве контролируемых точек или сечений). На данный момент общая методология решения такой оптимизационной задачи в области координатного контроля отсутствует. Авторами [58] разработаны отдельные элементы методологии решения этой задачи, однако и они требуют доработки для обеспечения их согласованности с целью дальнейшего использования в рамках единой концепции.

Во-вторых, 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. Исключение составляет контроль параметров с зависимыми допусками, которые контролируются комплексными калибрами. Однако такая процедура комплексного измерительного контроля не дает достаточной измерительной информации, необходимой для корректирования технологических процессов изготовления деталей или принятия управляющих решений с использованием обратной связи. Кроме того, контроль геометрических параметров с помощью комплексных калибров имеет ограниченную сферу применения.

Выделенные особенности измерительного контроля на базе традиционного подхода приводят к появлению в результатах измерений неисключенных методических погрешностей систематического характера из-за несовпадения систем координат, в которых

измеряются разные геометрические параметры деталей, и как результат, к увеличению количества неправильно принятых и неправильно забракованных деталей. Таким образом, общим недостатком традиционных технологий координатного контроля геометрических параметров деталей является отсутствие оптимизации расположения всех контролируемых точек реальной детали относительно ее номинальной системы координат, а также сопряженной с этим оптимизации взаимосвязанных полей допусков контролируемых параметров. Для осуществления такой оптимизации координаты рассматриваемых точек должны измеряться в некоторой единой системе координат, задаваемой используемым средством измерения. Одним из возможных путей совершенствования координатных измерений является оптимизация систем координат.

С целью повышения качества контроля геометрических параметров деталей предлагается новый подход к координатным измерениям.

Контролируемую деталь необходимо рассматривать как комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных реальных геометрических элементов (поверхностей, профилей, точек и т.д.), отделяющих ее от окружающей среды. При этом предельные размеры детали – это комплекс взаимосвязанных предельных размеров всех элементов детали, образующих одно общее поле допуска и определяющее два комплексных предельных контура детали, один из которых соответствует пределу максимума материала, а второй – пределу минимума материала детали. 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 (верхним и нижним, т.е. соответствующими пределу максимуму материала и пределу минимуму материала детали).

Положение таких контуров может быть определено и описано аналитически в соответствии с заданными на чертеже детали полями допусков всех рассматриваемых элементов, представляемы-

ми при этом как некоторый комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных полей допусков (область или пространство допусков детали) [59]. Для проверки годности при таком условии 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 «расположить» контролируруемую деталь и так перераспределить поле ее допусков, чтобы все ее реальные элементы «вписались» между «плавающими» в этом случае предельными контурами, то такая деталь может считаться функционально годной. При этом вовсе не исключается, что при использовании традиционного подхода к контролю эта же деталь может быть забракована по отдельным геометрическим параметрам или элементам. Похожий подход используется при контроле зависимых допусков расположения, где возможна «компенсация» отклонений расположения, выходящих за формально назначенное поле допуска, за счет изменения размеров от предела максимума материала к пределу минимума материала детали.

Суть контроля геометрических параметров детали на основе принципа перераспределения полей допусков можно продемонстрировать с помощью схемы, представленной на рис. 4.5.

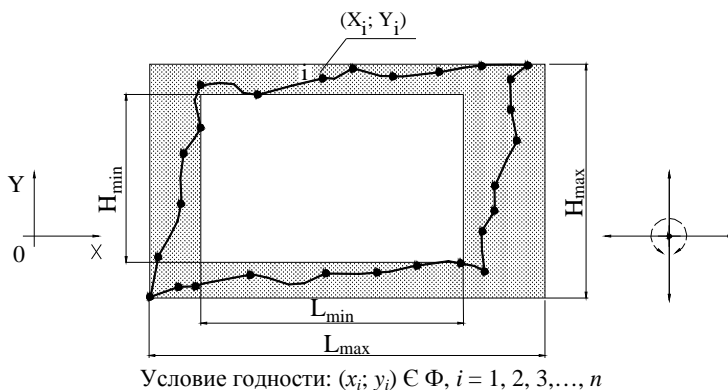


Рисунок 4.5 – Контроль размеров детали на основе принципа перераспределения полей допусков

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 измерительной задачи такого типа можно представить в виде следующего ряда последовательных этапов и операций (рис. 4.6):

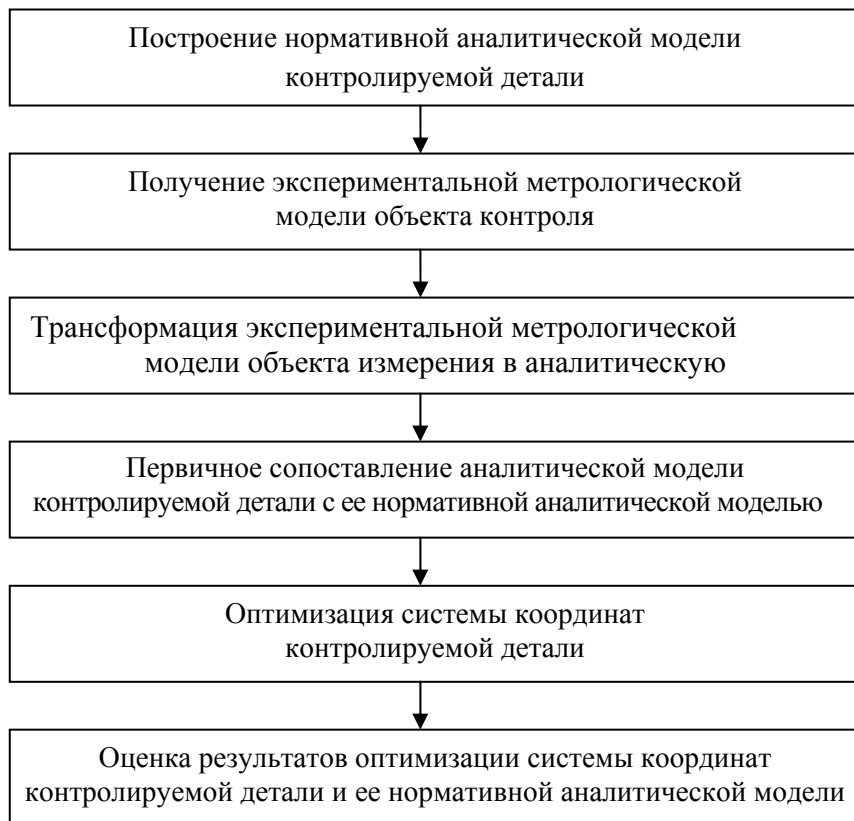


Рисунок 4.6 – Алгоритм процедуры контроля размеров деталей на основе принципа перераспределения полей допусков

1. Аналитическое описание области или пространства допуска объекта измерения (построение нормативной аналитической модели контролируемой детали).

2. Измерение геометрических параметров контролируемой детали и, как результат, 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 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, т.е. оптимизацией расположения предельных контуров детали (оптимизацией области или пространства допуска детали), с целью обеспечения наилучших условий (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.

Суть первого этапа алгоритма состоит в описании предельных контуров контролируемой детали на основании данных ее чертежа, что представляет собой тривиальную задачу аналитической геометрии.

На втором этапе алгоритма по результатам измерения координат ограниченного количества точек контролируемой детали строится экспериментальная метрологическая модель объекта измерения. Для решения этой задачи могут использоваться трехкоординатные измерительные приборы, обеспечивающие решение более 90 % измерительных задач в машиностроении и приборостроении.

4.2 Математическое обоснование возможности оптимизации координатного контроля геометрических параметров «плоских» деталей

При оценке геометрических параметров номинально плоских поверхностей анализируется размер, форма и расположение (макрогеометрия) поверхностей. В качестве анализируемого объекта в работе выберем параметры макрогеометрии детали, имеющей номинально прямоугольную форму, учитывая, что эти поверхности являются важнейшими с точки зрения функционального назначения деталей.

В зависимости от конструкции деталей, имеющих номинально прямоугольную форму, их расположение приходится рассматривать в пространстве или на плоскости. Для последовательного решения ограничимся рассмотрением плоской задачи, которая характерна для контроля деталей относительно небольшой толщины. Представителями таких деталей являются печатные платы электронных устройств, мосты и платы приборов, крышки редукторов и подшипников и т.п.

Теоретической основой предлагаемой методики является принципиально новый подход к координатному контролю геометрических параметров детали [60], позволяющий минимизировать погрешности метода путем их аналитической компенсации и повысить за счет этого качество контроля. Принципиальное отличие этого подхода от традиционного описано в предыдущем разделе и состоит в иной трактовке предельных размеров детали, оптимизации ее системы координат с одновременным аналитическим перераспределением взаимосвязанных

полей допусков (оптимизацией комплексного пространства поля допуска детали). Порядок реализации такого подхода рассмотрим на примере контроля линейных размеров «плоской» детали, имеющей номинально прямоугольную форму.

Будем исходить из того, что массив исходной измерительной информации уже получен, и он включает двумерные декартовы координаты множества контрольных точек детали, равномерно расположенных на всех ее контролируемых элементах (не менее трех точек на каждом). Таким образом, можно в данном случае говорить об уже состоявшемся преобразовании реальной контролируемой детали в ее некоторую дискретную экспериментальную модель. В соответствии с используемым здесь подходом дальнейшая задача состоит в аналитическом поиске такого «расположения» контролируемой детали (ее экспериментальной модели), чтобы все ее реальные элементы по возможности «вписались» между «плавающими» предельными контурами с перераспределением полей допусков элементов в пределах комплексного пространства (поля) допуска детали. При положительном решении такой задачи деталь может считаться функционально годной. Исходя из этого, предлагается следующий алгоритм решения поставленной задачи.

Предположим, что координаты контрольных точек детали были измерены в некоторой в декартовой системе координат с началом отсчета в точке O' (рис. 4.7).

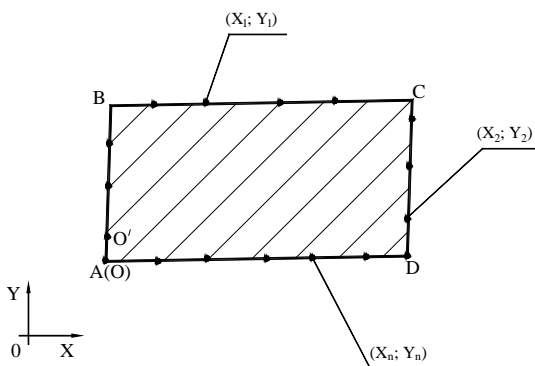


Рисунок 4.7 – Расположение контрольных точек детали

В результате таких измерений был получен массив координат контрольных точек $\{(x_1, y_1) (x_2, y_2) (x_i, y_i) (x_n, y_n)\}$. Считаем, что количество контрольных точек n имеет фиксированное значение, определяемое конфигурацией и размерами контролируемой детали, а также целью и задачей измерений.

Для решения поставленной задачи оптимизации первоначально перейдем новой декартовой системе координат с началом отсчета совпадающей с угловой точкой A и осями, направленными вдоль линий AB и AD контролируемой детали. Переход от системы координат с центром в точке O' , к новой системе координат с центром в точке A (O) не требует дополнительных измерений и может быть осуществлен тривиальной математической обработкой исходных координат контрольных точек.

Началом отсчета новой системы координат будет являться угловая точка пересечения аппроксимирующих прямых, проходящих через точки $(N; N - 1)$ и $(N - 1; N - 2)$ (рис. 4.8).

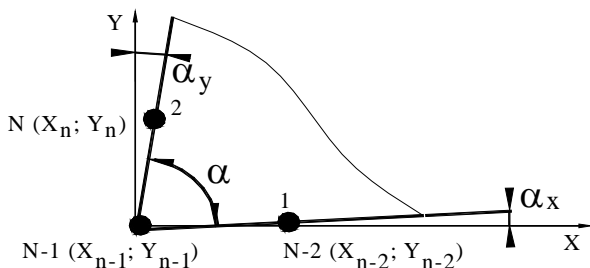


Рисунок 4.8 – Определение системы координат

Уравнение прямой, проходящей через определяющие точки N и $N - 1$ можно записать в следующем виде:

$$\frac{y - y_n}{y_{n-1} - y_n} = \frac{x - x_n}{x_{n-1} - x_n},$$

$$\begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_n & y_n & 1 \\ x_{n-1} & y_{n-1} & 1 \end{vmatrix} = \Theta \quad (4.1)$$

Аналогично уравнение прямой, проходящей через точки $N - 1$ и $N - 2$ может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{y - y_{n-1}}{y_{n-2} - y_{n-1}} = \frac{x - x_{n-1}}{x_{n-2} - x_{n-1}}, \quad (4.2)$$

Такие же выражения можно записать для любых выбранных проконтролированных точек детали.

Определим углы между отрезками прямых, проходящих через выделенные точки N , $N - 1$ и $N - 1$, $N - 2$ и осями координат OX и OY . Поскольку, по условию задачи предельные прямоугольные контуры должны иметь стороны параллельные сторонам контролируемой детали имеющей номинально прямоугольную форму, то

$$\cos \alpha_x^I = \frac{x_n - x_{n-1}}{\sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2}} \quad (4.3)$$

$$\cos \alpha_y^I = \frac{y_n - y_{n-1}}{\sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2}} \quad (4.4)$$

Аналогично определяются углы α_x^{II} , α_y^{II} .

Средние значения углов между отрезками выделенных прямых и осями координат OX и OY определяются по формулам:

$$\langle \alpha_x \rangle = \alpha_x = \frac{(\alpha_x^I + \alpha_x^{II})}{2} \quad (4.5)$$

$$\langle \alpha_y \rangle = \alpha_y = \frac{(\alpha_y^I + \alpha_y^{II})}{2} \quad (4.6)$$

Точка $N-1$, в которой выполняются условие $\cos \alpha \approx 0$ должна быть принята в качестве начала новой системы координат XOY , относительно которой будет осуществляться поиск оптимального расположения реальных элементов детали с одновременным перераспределением полей допусков.

Переход от измеренных координат точек профиля в системе координат с базовой точкой O' к координатам этих точек в системе координат с центром в точке O , осуществляется элементарными методами и с точки зрения математики не вызывает затруднений.

Рассмотрим условия функциональной годности «бракованной» детали, т.е. критерии возможности ее вписывания между двумя предельными «плавающими» контурами детали, имеющими прямоугольную форму.

Базируясь на сформулированных ранее принципах, для того, чтобы забракованную при использовании традиционного метода, деталь можно было считать функционально годной, необходимо соблюдение следующего определяющего условия (рис. 4.9):

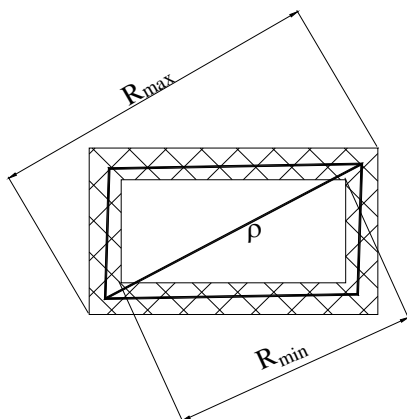


Рисунок 4.9 – Графическая интерпретация необходимого условия решения задач

где ρ – радиус-вектор диагонали контролируемой детали;

R_{\max} , R_{\min} – диагонали прямоугольных предельных контуров, соответствующих пределу максимума и пределу минимума материала детали номинально прямоугольной формы;

Данное условие (4.7) является необходимым, но не достаточным условием возможности вписывания контура реальной детали между предельными контурами.

Достаточным же условием будет выполнение для определяемого аналитически угла дополнительного поворота детали следующих неравенств (рис. 4.10):

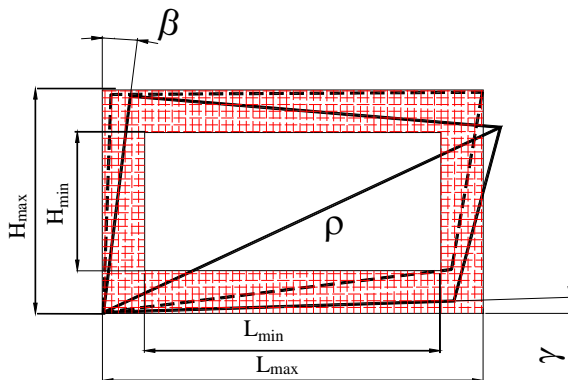


Рисунок 4.10 – Графическая интерпретация достаточного условия решения задач

$$\begin{aligned} \gamma &> 0; \\ \beta &> 0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

В качестве положительного направления вращения детали определен поворот против часовой стрелки для угла γ и по часовой – для угла β .

Оба описанных условия (4.7 и 4.8) являются гарантией того, что при удачном контуре детали, используя новую переориентированную систему координат с началом в точке O и дополнительный поворот детали в пределах поля допуска, реальный контур контролируемой детали будет вписан между предельными контурами, т.е. формально забракованная другим методом контроля деталь может быть признана как функционально годная. Это безусловно, позволит повысить достоверность контроля, сократить количество неправильно забракованных деталей и уменьшить издержки производства.

Ограничение, связанные с невыполнением только одного из двух предложенных условий достаточности (4.8) для решения

поставленной задачи в системе координат с началом отсчета в точке O , можно преодолеть, осуществив параллельный перенос центра вращения детали (точки O) вдоль линий профиля детали с последующим выполнением дополнительного ее поворота. Диапазон возможного переноса центра вращения определяется условием (4.7). В случае, когда невозможно найти новую точку вращения, обеспечивающую вписывание реального контура в поле допуска, деталь все же должна быть признана бракованной.

4.3 Методика координатного контроля геометрических параметров номинально плоских поверхностей деталей с оптимизированной интерпретацией предельных размеров

При координатных измерениях профиль реальной поверхности заменяется его моделью, построенной по контрольным точкам. Наиболее удачным является выбор одной и той же модели для контроля всех геометрических параметров «плоской» детали. В связи с тем, что допуск формы поперечного сечения поверхности ограничивается допуском размера, есть основание утверждать, что модель профиля, построенная для оптимизации координатного контроля, может быть использована и для определения размера.

Рассмотрим наиболее общую задачу контроля геометрических параметров «плоской детали» по результатам координатных измерений ограниченного числа произвольно расположенных точек на профиле реальной поверхности.

Для построения дискретной экспериментальной модели реального профиля детали номинально прямоугольной формы может использоваться грубое и точное моделирование [61].

В случае «грубой» модели реальный профиль моделируется отрезками прямых, построенных по точкам профиля (x_{km}) и (y_{km}) методом наименьших квадратов. Индекс k принимает значения от 1 до 4 и указывает номер стороны детали, а индекс m – номер точки, принадлежащей k -ой стороне детали $ABCD$, и принимает значения от 1 до N . Точки (x_{km}) и (y_{km}) реального профиля G_k

(рис. 4.11) выбирались на прямых, образующих длинные и короткие стороны детали $ABCD$ и описываемые уравнением:

$$\frac{y - y_{kl}}{y_{kN} - y_{kl}} = \frac{x - x_{kl}}{x_{kN} - x_{kl}}. \quad (4.9)$$

На длинных сторонах AD и BC детали с шагом $\Delta x = \frac{(a_1 + a_2)}{N}$ в точках, определяемых соотношением $x_i = x_{k+1} + i\Delta x$, вычислялись по формулам (4.9) соответствующие значения y , на которые затем аддитивно накладывался шум, моделированный встроенной в пакет программы MATHCAD функцией $gnorm(m, s, N)$.

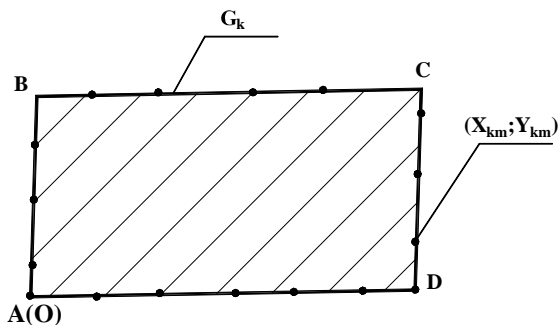


Рисунок 4.11 – Расположение точек реального профиля

Параметры, задающие $gnorm(m, s, N)$ выбирались следующим образом: математическое ожидание m бралось равным нулю, а среднеквадратическое отклонение s связывалось некоторым функциональным соотношением с допусками на размер δ детали. Аналогичным образом моделировались короткие стороны AB и CD детали. Однако, здесь дискретизировалась переменная y с шагом $\Delta y = \frac{(b_1 + b_2)}{N}$, а шум накладывался на значения x , вычисляемые по формуле (4.9).

При построении «точной» модель в качестве реального профиля выбирались линейные интерполяционные сплайны (аппроксимирующие прямые), построенные на точках (x_{km}) и (y_{km}) , с по-

мощью встроенной в MATHCAD функции *linterp*. Точки реального профиля (x_{km}) и (y_{km}) выбирались аналогично «грубой» модели.

Допустим, что измерение координат точек детали $ABCD$, имеющей номинально прямоугольную форму, проведено в декартовой системе координат относительно базовой точки A (см. рис. 4.11). В результате измерений получен набор координат (X_{km}, Y_{km}) ограниченного количества точек, определяемого конфигурацией и размерами контролируемой детали и исходя из поставленной цели и задачи измерения.

Пределные контуры номинально прямоугольной детали $ABCD$ с учетом возможности постулируемого в работе перераспределения полей допусков, можно представить графически в виде внешнего и внутреннего прямоугольников, образованных соответственно максимальными предельными и минимальными предельными контурами.

Для осуществления оптимизации системы координат и перераспределения полей допусков детали необходимо совместить реальный профиль G плоской детали $ABCD$ (рис. 4.12), являющейся выпуклым четырехугольником, с областью S , образованной внешним предельным прямоугольником с размерами $a_e b_e$ и внутренним с размерами $a_i b_i$.

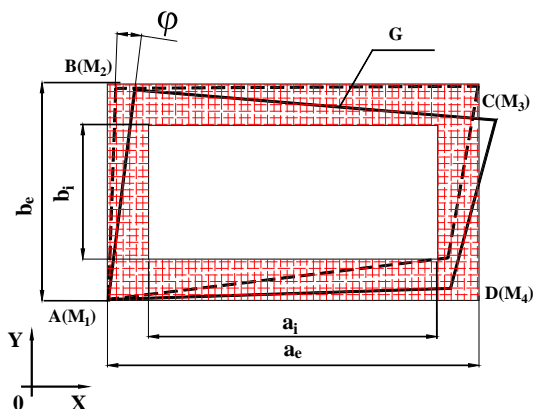


Рисунок 4.12 – Оптимизация перераспределения полей допусков

Совмещение может осуществляться путем поворота реального профиля G в пределах области S на некоторый угол φ и плоскопараллельного переноса профиля на вектор смещений $A = (A_x, A_y)$.

Положительный ответ на вопрос о возможности перераспределения полей допусков детали $ABCD$ возможен лишь в случае выполнения необходимого и достаточного условий (4.7, 4.8) существования решения на геометрические параметры детали. Для оптимизации координатных измерений без доказательства дополнительно накладывались следующие очевидные условия, которые не исследовались на независимость и полноту:

1) Проекция диагоналей номинально прямоугольной детали $ABCD$ должны соответствовать соотношениям:

$$\begin{aligned}
 b_i &\leq \left| \text{Пр} \left(\vec{r}_3 - \vec{r}_1 \right) \Big|_{\vec{b}_e} \right| \leq b_e; \\
 b_i &\leq \left| \text{Пр} \left(\vec{r}_4 - \vec{r}_2 \right) \Big|_{\vec{b}_e} \right| \leq b_e; \\
 a_i &\leq \left| \text{Пр} \left(\vec{r}_3 - \vec{r}_1 \right) \Big|_{\vec{a}_e} \right| \leq a_e; \\
 a_i &\leq \left| \text{Пр} \left(\vec{r}_4 - \vec{r}_2 \right) \Big|_{\vec{a}_e} \right| \leq a_e;
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

где r_1 – радиус-вектор точки A вершины M_1 номинально прямоугольной детали $ABCD$;

r_2 – радиус-вектор точки B вершины M_2 номинально прямоугольной детали $ABCD$;

r_3 – радиус-вектор точки C вершины M_3 номинально прямоугольной детали $ABCD$;

r_4 – радиус-вектор точки D вершины M_4 номинально прямоугольной детали $ABCD$.

2) Площадь S_D и периметр P_D реальной «плоской» детали должны лежать между площадями и периметрами предельных контуров:

$$a_i b_i \leq S_D < a_e b_e, \tag{4.11}$$

$$P_i \leq PD \leq P_e, \quad (4.12)$$

где P_e – периметр внешнего прямоугольника;

P_i – периметр внутреннего прямоугольника;

3) Диагонали d_1 ; d_2 номинально прямоугольной детали $ABCD$ соответствуют следующим соотношениям:

$$d_i \leq d_1 \leq d_e, \quad (4.13)$$

$$d_i \leq d_2 \leq d_e, \quad (4.14)$$

где d_e ; d_i – длины диагоналей внешнего и внутреннего предельных прямоугольников соответственно.

4) Погрешность измерения координат точек реального профиля пренебрежимо мала по сравнению с допуском на размер детали $ABCD$.

Нахождение возможной области перераспределения полей допусков и оптимизации систем координат «плоской» детали предлагается от обратного. Предположим, что реальный профиль детали посредством поворота на некоторый угол φ относительно исходной декартовой измерительной системы координат уже вписан во внешний прямоугольник со сторонами a_e и b_e . Исходная измерительная система координат выбрана следующим образом: ось X направлена вдоль «длинной» стороны внешнего прямоугольника, а ось Y направлена вдоль «короткой» стороны внешнего прямоугольника (см. рис. 4.13).

Координаты точек $M_{k,m}$ реального профиля детали будем задавать комплексными числами $x_{k,m} + i y_{k,m}$, где $x_{k,m}$ – m -я x -координата k -й стороны детали $ABCD$; $y_{k,m}$ – m -я y -координата k -й стороны детали $ABCD$; i – мнимая единица; $k = 0 \dots 3$ – номер стороны детали.

Тогда, координаты точек $M_{k,m}$ профиля детали, повернутой на угол φ относительно исходной измерительной системы координат, представленные в виде комплексного числа, будут равны $(x_{k,m} + i y_{k,m})e^{i\varphi}$.

В том случае, если реальный профиль G плоской детали $ABCD$ вписан во внешний предельный прямоугольник $a_e b_e$, а

внутренний предельный прямоугольник $a_i b_i$ вписан в деталь, выполнение следующих геометрических соотношений очевидно:

$$\begin{aligned} a_i &\leq \left| R_e [(x_{om} - x_{2n}) + i(y_{om} - y_{2n})] e^{i\phi} \right| \leq a_e; \\ b_i &\leq \left| I_m [(x_{om} - x_{2n}) + i(y_{om} - y_{2n})] e^{i\phi} \right| \leq b_e. \end{aligned} \quad (4.15)$$

где R_e – действительная часть комплексного числа, а I_m – мнимая часть комплексного числа.

Указанные соотношения (4.15) имеют следующий геометрический смысл:

а) первое выражение определяет проекцию на ось X отрезка, соединяющего две любые точки коротких сторон реального профиля детали, повернутой относительно исходной системы координат на угол ϕ .

б) второе выражение определяет проекцию на ось Y отрезка, соединяющего две любые точки длинных сторон реального профиля детали $ABCD$, повернутой относительно исходной системы координат на угол ϕ .

Следовательно, область возможных решений задачи - это все углы ϕ , для которых выполняется условие (4.15) системы и дополнительно накладываемые соотношения:

$$F_1(\phi) = \min \left| \operatorname{Re} [(x_{om} - x_{2n}) + i(y_{om} - y_{2n})] e^{i\phi} \right|; \quad (4.16)$$

$$F_{11}(\phi) = \max \left| \operatorname{Re} [(x_{om} - x_{2n}) + i(y_{om} - y_{2n})] e^{i\phi} \right|;$$

$$\Delta_1(\phi) := F_{11}(\phi) - F_1(\phi); \quad (4.17)$$

$$F_2(\phi) = \min \left| \operatorname{Im} [(x_{om} - x_{2n}) + i(y_{om} - y_{2n})] e^{i\phi} \right|; \quad (4.18)$$

$$F_{21}(\phi) = \max \left| \operatorname{Im} [(x_{om} - x_{2n}) + i(y_{om} - y_{2n})] e^{i\phi} \right|;$$

$$\Delta_2(\phi) := F_{21}(\phi) - F_2(\phi), \quad (4.19)$$

где F_1 , F_{11} , F_2 и F_{21} – функции угла поворота.

$$\Delta_1(\phi) \leq \delta_1; \Delta_2(\phi) \leq \delta_2, \quad (4.20)$$

где δ_1, δ_2 - допуски на размер длинной и короткой стороны детали соответственно.

В том случае, когда одновременно выполняются условия (4.20) – решение задачи возможно. кроме этого соотношения (4.20) определяют такую область углов ϕ , где разность между минимальными действительными размерами детали меньше чем δ_1 и δ_2 соответственно.

Для определения области углов, для которых одновременно выполняются условия (4.20) в автоматическом режиме с помощью встроенной в Mathcad функции Find(ϕ) отыскиваются правые наибольшие предельные границы $\Phi_{1u}(\phi)$ и $\Phi_{2u}(\phi)$ и левые наименьшие предельные границы $\Phi_{1e}(\phi)$ и $\Phi_{2e}(\phi)$ углов. Для этого вводятся функции максимума Γ_e и минимума Γ_u предельных сторон угла.

$$\begin{aligned} \Gamma_u &= \min(\Phi_1, \Phi_2); \\ \Gamma_e &= \max(\Phi_1, \Phi_2); \end{aligned} \quad (4.21)$$

Очевидно, что если $\Gamma_e < \Gamma_u$, то решение (4.20) возможно. Далее вычисляем функции, определяющие внешние и внутренние предельные контуры номинально прямоугольного профиля (см. рис. 4.13).

Внешний предельный контур прямоугольного профиля описывается формулами:

$$\begin{aligned} a_e a(\phi) &= \max(|F_1(\phi)|, |F_{11}(\phi)|) \\ b_e b(\phi) &= \max(|F_2(\phi)|, |F_{21}(\phi)|) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Внутренний предельный контур прямоугольного профиля выражается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} a_i a(\phi) &= \min(|F_1(\phi)|, |F_{11}(\phi)|) \\ b_i b(\phi) &= \min(|F_2(\phi)|, |F_{21}(\phi)|) \end{aligned} \quad (4.23)$$

где F_1, F_{11}, F_2 и F_{21} – функции угла поворота, вычисляемые по формулам (4.16) и (4.18).

Затем для области углов $[\Gamma_e, \Gamma_u]$ строятся графики функций, математически описывающие «реальный профиль» G «плоской» детали для каждой из ее сторон:

$$\begin{aligned} G_1(\varphi) &= b_i b(\varphi) - b + \delta_2; \\ G_2(\varphi) &= a_i a(\varphi) - a + \delta_1; \\ G_3(\varphi) &= b_e b(\varphi) - b - \delta. \end{aligned} \tag{4.24}$$

Если область значений углов φ , где одновременно выполняются условия, не является пустым множеством, то одно из значений угла поворота из указанной области является решением поставленной задачи.

$$\begin{aligned} G_1(\varphi) &\geq 0; \\ G_2(\varphi) &\geq 0; \\ G_3(\varphi) &\leq 0; \\ G_4(\varphi) &\leq 0. \end{aligned} \tag{4.25}$$

Указанный алгоритм был реализован и апробирован с использованием пакета программы Mathcad.

ГЛАВА 5 СПЕЦИАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ

5.1 Классификация средств координатных измерений

Для решения различных измерительных задач в ходе операционного контроля геометрических параметров деталей машино- и приборостроения используются разнообразные средства координатных измерений (СКИ). На сегодняшний день разработаны и серийно выпускаются сотни различных типов координатных измерительных приборов, каждый из которых характеризуется индивидуальным набором метрологических характеристик. Вместе с тем, при проектировании методик выполнения измерений выбор СИ предполагает учет совокупности свойств, включающих как метрологические характеристики, так и свойства, характеризующие конструктивное исполнение и особенности эксплуатации СИ. Для упрощения процедуры выбора СИ целесообразно использовать общую систему классификации СКИ.

Анализ литературных источников позволяет выделить следующие классификационные признаки СКИ:

- количество аппаратурно-реализуемых осей координат;
- способ реализации системы координат;
- способ базирования объекта и СИ;
- характер взаимодействия с объектом измерения;
- область применения;
- степень универсальности.

Перечисленные характеристики и свойства СКИ образуют классификационные признаки, на основании которых может быть построена система классификации, представленная на рис. 5.1.

Координатные измерения могут осуществляться в различных системах координат: прямоугольной, полярной, цилиндрической и сферической.

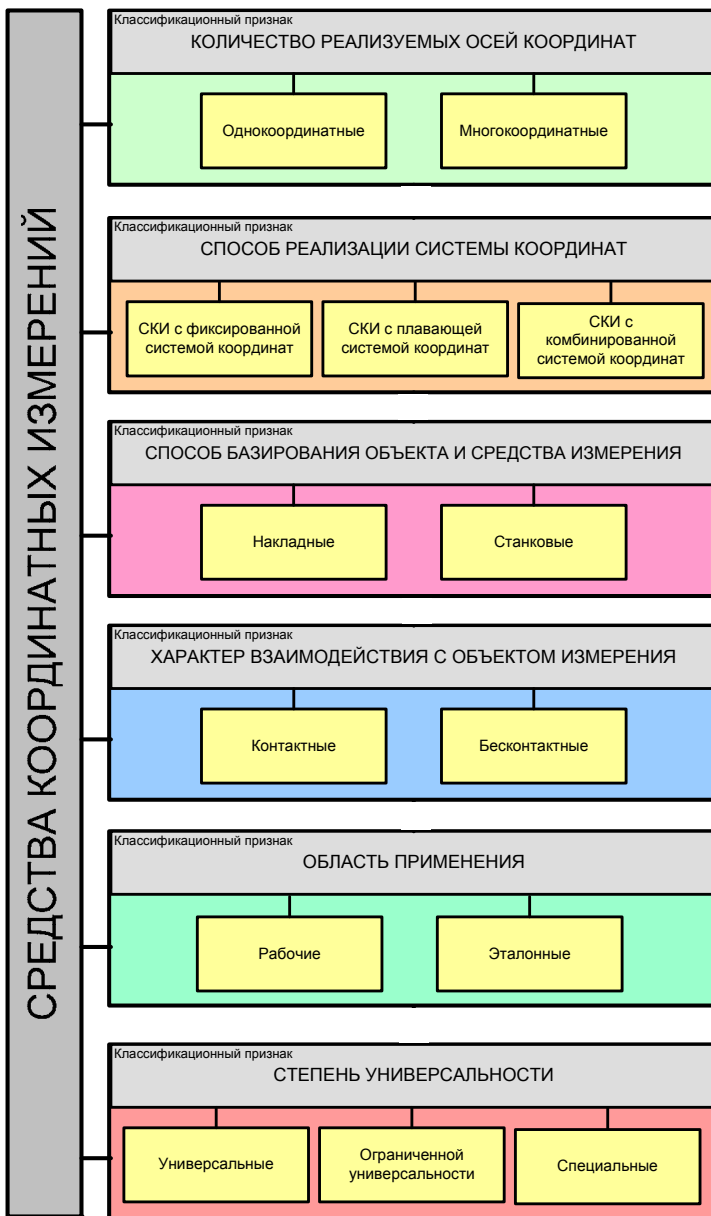


Рисунок 5.1 – Классификация СКИ

Выбор системы координат измерительного прибора обусловлен номинальной геометрической формой объекта контроля и видом измеряемого параметра. От вида реализуемой системы координат существенно зависит конструктивное исполнение прибора.

В зависимости от количества реализуемых аппаратурных осей координат, все используемые СИ могут быть классифицированы как однокоординатные и многокоординатные.

В зависимости от способа базирования объекта и СИ различают накладные и станковые СКИ. Различие между данными типами СКИ состоит в том, что накладные СКИ базируются по детали, а на станковом СКИ деталь базируют на соответствующем элементе СКИ.

При этом накладные СКИ оператор при проведении измерений держит в руках, в то время как станковые устанавливаются во вспомогательных установочных узлах (штативах, стойках, и т.д.) или на своих основаниях.

Эти различия отражаются на структуре погрешности измерения, в частности при использовании накладных СКИ в погрешность результата измерения необходимо включать такие составляющие как погрешность, обусловленная нагревом СКИ теплом рук оператора, методическая составляющая, обусловленная несоблюдением принципа Аббе, и т.д. Подробный анализ структуры погрешности измерения при использовании накладных и станковых СКИ приведен в работе [62].

В зависимости от способа реализации системы координат различают СКИ с фиксированной и плавающей системой координат. Накладные СИ реализуют плавающую систему координат, а станковые – фиксированную. Вместе с тем, универсальные СКИ, позволяющие решать широкий круг измерительных задач, нельзя однозначно отнести к тому или другому классу. Это связано с тем, что в таких средствах (классическим примером является координатно-измерительная машина – КИМ) система координат самого СКИ и система координат объекта измерения не совпадают. Более того, в современных СКИ такого рода используется также виртуальная трехмерная модель объекта

измерения, которая загружается в память СКИ в виде файла трехмерной модели одного из распространенных форматов (PRO-E, Solid Works, AutoCAD, Unigraphics, и др). Для реализации измерения в данном случае необходимо произвести ориентацию (либо совмещение) систем координат объекта измерения, его виртуальной модели и самого СКИ. Такие СКИ невозможно отнести к одному или другому классу, в связи с чем их целесообразно выделить в отдельный класс: СКИ с комбинированной системой координат.

Реализация различных физических принципов измерения координат точек контролируемых поверхностей позволила разработать контактные и бесконтактные СКИ. Бесконтактные СКИ как правило реализуют оптические принципы измерения, а контактные – механические и электромеханические.

В настоящее время для решения задач операционного и приёмочного контроля все чаще применяют бесконтактные СКИ, причем наибольшее распространение на сегодняшний день получили установки лазерного сканирования (УЛС). УЛС могут быть реализованы на различных физических принципах, в частности на принципе трилатерации либо реализации полярной системы координат.

Исходя из области применения, все СКИ можно разделить на рабочие и эталонные. К рабочим относятся СИ, используемые на практике для измерения параметров различных объектов (промышленной продукции, процессов и т.д.). При этом цели таких измерений могут существенно отличаться. В то же время эталонные СИ не предназначены для практических измерений физических величин, а служат только для передачи размеров единиц физических величин нижестоящим по метрологической соподчиненности СИ, вплоть до рабочих. Таким образом, основное назначение таких СИ состоит в обеспечении прослеживаемости результатов измерений физических величин, получаемых с помощью рабочих СИ, до единиц физических величин Международной системы единиц (СИ), воспроизводимых с помощью Национальных или Международных эталонов.

В зависимости от степени универсальности СКИ подразделяют на универсальные, ограниченной универсальности (специализированные) и специальные. Основным критерием универсальности, по которому СКИ можно разделить на три класса, является гибкость реализуемой на их базе измерительной процедуры – интегральный показатель, сочетающий в себе:

- количество измерительных задач, при решении которых может быть использовано данное СКИ;
- степень автоматизации процесса измерения;
- возможность измерения геометрических параметров деталей различных габаритов и массы;
- возможность измерения геометрических параметров деталей с различными по номинальной форме поверхностями;
- возможности по перенастройке и перепрограммированию СКИ при переходе от измерения одной детали к другой.

Универсальные СКИ характеризуются максимальной гибкостью измерительной процедуры. СКИ, являющиеся универсальными, позволяют решать практически весь круг задач, относимых к линейным и угловым измерениям, то есть определять отклонения размеров, формы и расположения любых поверхностей широкой номенклатуры деталей. Процесс измерения при использовании универсальных СКИ в значительной степени автоматизирован. К данному классу относятся такие СКИ как КИМ, установки промышленной томографии и лазерного сканирования.

СКИ ограниченной универсальности характеризуются средней степенью гибкости измерительной процедуры. Использование данных СКИ (в том числе с различными вспомогательными приспособлениями) позволяет производить измерения большинства параметров макрогеометрии поверхностей деталей. Кроме того, данные СКИ могут использоваться при измерении геометрических параметров широкой номенклатуры деталей, практически без ограничений по габаритным размерам и массе. Примеры использования СКИ ограниченной универсальности при измерении параметров габаритных массивных деталей (турбинные, прокатные и коленчатые валы) можно найти в статье профессора Софийского университета Х. Радева [63]. Единствен-

ным серьезным ограничением их применения является наличие у объекта измерения «сложных» поверхностей второго и более высоких порядков (эллиптические, тороидальные, параболоидные и др. поверхности). Вместе с тем, измерения с использованием таких СКИ является чаще всего неавтоматизированными и данные СИ редко позволяют получить электрический сигнал измерительной информации для его последующей обработки, что приводит к необходимости ручного расчета измеряемых параметров.

К СКИ ограниченной универсальности относятся как простейшие СИ – специальные штангенприборы, специальные микрометры, установленные в скобы или другие конструкции индикаторные головки часового типа и рычажно-зубчатые измерительные головки, микаторы, и др., так и более сложные по своей конструкции ДИП, измерительные микроскопы, интерферометры и т.д.

Специальные СКИ рассчитаны на измерение одного или нескольких геометрических параметров детали определенного типоразмера. Гибкость измерительной процедуры в этом случае является минимальной. При этом данные СКИ могут характеризоваться высокой степенью автоматизации измерительной процедуры, автоматическим расчетом измеряемых параметров, широкими возможностями по перепрограммированию. Кроме того, использование данных СКИ часто позволяет повысить производительность измерений и не требует высокой квалификации оператора и специальных условий окружающей среды (термостатирование помещения, виброизоляция и др.).

Немаловажной особенностью специальных СКИ является их приспособленность к измерению сложных поверхностей. На машиностроительных предприятиях нашли широкое применение специальные СКИ параметров колец подшипников, сфер и конусов, лопаток турбин, кулачков и других деталей со сложными поверхностями.

Таким образом, анализ свойств специальных СКИ позволяет утверждать, что применение данных средств в ряде случаев явля-

ется предпочтительным при операционном контроле геометрических параметров поверхностей деталей.

5.2 Принципы построения и структурные схемы специальных средств операционного контроля геометрических параметров деталей

Анализ особенностей реализации и использования специальных многомерных координатных средств измерения геометрических параметров деталей показывает некоторые возможности оптимизации их проектирования [64, 65].

Высокая эффективность разработанных оптимизированных методов координатных измерений геометрических параметров деталей может быть обеспечена при использовании для их реализации средств измерения, также оптимизированных с точки зрения решаемой измерительной задачи. Причем максимального эффекта здесь можно достичь на основе комплексного подхода, заключающегося в том, что рационализация методов измерений и совершенствование средств измерений рассматриваются как две взаимосвязанные задачи, решаемые совместно с целью максимального повышения качества координатных измерений. В массовом и серийном производстве для решения большинства измерительных задач более выгодным представляется использование специальных средств координатных измерений (СКИ), причем наибольшего эффекта здесь можно достичь, применяя многомерные измерительные приборы.

Специальные СКИ чаще всего реализуются в виде совокупности жестко связанных между собой СИ ограниченной универсальности, таких как измерительные головки, измерительные преобразователи перемещения с унифицированным выходным сигналом и т.д., образующих многощуповые измерительные головки (МИГ). Специальные СКИ, в измерительных головках, которых используются измерительные преобразователи, будем называть специальными многощуповыми средствами измерений (СМСИ), а используемые в них первичные преобразователи – щупами [82]. Ис-

ходя их конструктивных соображений, СМСИ оснащаются ограниченным количеством щупов.

При этом количество и расположение щупов выбирается исходя из количества и расположения контролируемых точек или сечений детали. За счет обеспечения дополнительных и/или вспомогательных перемещений головки по отношению к контролируемой детали или наоборот (например, при реализации шаговой процедуры измерения), количество щупов может быть уменьшено по отношению к количеству контролируемых точек детали. Многощуповая измерительная головка может быть либо неподвижной по отношению к контролируемой детали, либо иметь возможность совершать вспомогательные и измерительные перемещения по одной, двум или трем координатам относительно объекта измерения. Следует отметить, что необходимые функциональные возможности многомерного средства измерения могут обеспечиваться и за счет аналогичных перемещений контролируемой детали по отношению к измерительной головке. Для фиксирования относительных перемещений измерительной головки и объекта измерения в конструкции многомерного средства измерения в общем случае может использоваться один, два или три отсчетных устройств, измерительных прибора или преобразователей, установленных по соответствующим осям координат. Общей особенностью всех без исключения специальных многомерных координатных средств измерения является необходимость их предварительного «выставления» или настройки по образцовой детали (мере).

Наиболее простым вариантом реализации рассматриваемого класса средств измерений являются многомерные координатные измерительные приборы, основанные на использовании стандартных измерительных головок, объединяемых в многощуповые блоки с помощью вспомогательных установочных узлов. Такие приборы отличаются большими габаритами, низкой оперативностью, невысокими эргономическими показателями, они имеют существенные ограничения по инструментальной доступности чувствительных элементов к контрольным точкам. Поэтому такой вариант реализации специальных многомерных

координатных средств измерения не получил широкого распространения на практике.

По сравнению с этим вариантом более эффективны многомерные координатные измерительные приборы, основанные на использовании в составе многощуповых измерительных головок различных измерительных преобразователей (емкостных, индуктивных, фотоэлектрических, пьезоэлектрических, резистивных и др.). В основе работы таких преобразователей лежат непрерывные и дискретные электрические явления. При работе многомерного многощупового средства измерения измерительные перемещения могут незначительно отличаться от значений допусков контролируемых параметров, следовательно, необходимые перебеги многощуповой измерительной головки могут быть на порядок меньше, чем у трехкоординатных измерительных приборов. Это обуславливает возможность и необходимость разработки соответствующих простых, миниатюрных и дешевых измерительных преобразователей, пригодных для использования в составе многомерных средств измерения в качестве нуль-индикаторов, определяющих положение контакта чувствительных элементов с контролируемой поверхностью детали. Разработка таких измерительных преобразователей представляет отдельную задачу.

Отличительной особенностью многомерных многощуповых средств измерений является возможность получать информацию о координатах выбранного числа точек контролируемых поверхностей деталей при относительно небольших перемещениях многощуповой измерительной головки по одной, двум или трем координатам.

Следовательно, при использовании таких приборов минимизируются погрешности, связанные с большими перемещениями измерительной головки (например, погрешности, возникающими из-за отклонений от перпендикулярности осей отсчетных измерительных преобразователей, фиксирующих перемещения измерительной головки по отношению к контролируемой детали). Экономичность производства и эксплуатации многомерных многощуповых средств измерения достигается за счет примене-

ния многощуповых измерительных головок, к точности которых не предъявляются высокие требования. Компенсация неточности изготовления измерительных головок осуществляется путем их самоаттестации непосредственно на приборе с использованием стандартных мер или специально разрабатываемых образцовых деталей (эталонных мер) максимально упрощенной конфигурации.

Возможности решения измерительных задач с использованием многомерных средств измерения столь же разнообразны, как и у трехкоординатных измерительных приборов. Наиболее рационально использование многомерных средств для одновременного измерения ряда геометрических параметров, например, размеров, отклонений формы и расположения совокупности или группы контролируемых поверхностей детали (для осуществления комплексного контроля детали по ряду ее функциональных геометрических параметров).

Типовые измерительные задачи, которые можно решать с использованием многомерных средств измерения можно разбить на следующие группы:

- контроль размеров, отклонений формы и расположения номинально плоских поверхностей, например, глубин, высот уступов, отклонений от плоскостности и параллельности, плоскостности и перпендикулярности, плоскостности и наклона поверхностей;

- контроль размеров, отклонений формы и расположения, наружных и внутренних номинально цилиндрических поверхностей, например, диаметров валов и отверстий, отклонений от параллельности, перпендикулярности, наклона и пересечения их осей, позиционных отклонений, а также отклонений от цилиндричности или круглости и профиля продольного сечения;

- контроль размеров отклонений формы и расположения, регулярно расположенных функциональных элементов сложных деталей типа гребенок, зубчатых реек, изделий с винтовыми поверхностями и др.

- комбинированные задачи, включающие определенные элементы перечисленных выше типовых задач.

Проведенный анализ особенностей реализации и использование специальных многомерных средств измерения позволяет говорить о перспективности этого класса измерительной техники, предназначенной для координатных измерений геометрических параметров деталей. Основными, наиболее важными достоинствами таких средств измерений являются высокая производительность и точность измерений, дешевизна и охват широкого круга измерительных задач. Очевидна необходимость создания нового класса многомерных многощуповых измерительных приборов специального или специализированного назначения, построенных на базе современных средств и принципов измерений, а также преобразования и обработки измерительной информации.

Из анализа особенностей реализации и использования многомерных координатных средств измерения следует, что для достижения максимального эффекта от эксплуатации таких измерительных приборов в основу их создания должны быть положены следующие основополагающие принципы.

1. Компоновка специальных многомерных средств измерений из унифицированных конструктивно и функционально законченных блоков-модулей (модульный принцип проектирования).

Использование этого принципа обеспечивает определенную «гибкость» специальных многомерных средств измерения за счет возможности их быстрой перекомпоновки и переналадки, позволяет существенно расширить номенклатуру решаемых измерительных задач и приблизить их по этому показателю к универсальным трехкоординатным измерительным приборам. Для реализации этого принципа необходима разработка серии функциональных модулей, согласованных по геометрическим параметрам присоединительных элементов, а также и по входным и выходным функциональным характеристикам.

2. Объединение в один блок-модуль множества чувствительных элементов, позволяющих реализовать параллельную схему измерения координат соответствующего множества контролируемых точек объекта измерения. При такой схеме измерения все контролируемые точки практически одновременно «ощупывают-

ся» множеством чувствительных элементов данного блока модуля, представляющего собой многощуповую измерительную головку.

3. Использование электроконтактных измерительных преобразователей или чувствительных модулей в качестве щупов для оснащения многощуповых измерительных головок, исполняющих роль нуль-индикаторов контакта чувствительных элементов с контролируемой поверхностью (поверхностями) детали.

Для выполнения требуемых функций могут быть разработаны специальные миниатюрные простые и дешевые измерительные преобразователи необходимой точности, что позволит существенно расширить функциональные возможности многомерных средств измерений. Это могут быть преобразователи, фиксирующие либо непосредственно электрическое замыкание чувствительного элемента и контролируемой детали (работающие на замыкание), либо фиксирующие размыкание специальной контактной пары внутри самого преобразователя (работающие на размыкание).

4. Использование в качестве отсчетных средств измерения, фиксирующих относительные перемещения многощуповой измерительной головки и контролируемой детали, измерительных преобразователей с выдачей сигнала измерительной информации в цифровом коде (электрических дискретных измерительных преобразователей).

Такие отсчетные измерительные преобразователи в составе многомерных средств измерения дают возможность накапливать, запоминать и обрабатывать измерительную информацию с помощью встроенного микропроцессора или автономного компьютера. Оснащение вычислительной техникой многомерных средств измерений позволяет избавиться от необходимости отсчитывать и фиксировать показания отдельных приборов в течение цикла измерения и от выполнения математической обработки результатов как автономной операции. Однако для получения, передачи, хранения и математической обработки больших массивов измерительной информации, которая получается и обрабатывается в ходе применения многомерного средства измерения, необходима разработка соответствующего математического и программного обеспечения. Отсюда вытекает не-

обходимость использовать также следующий, не менее важный принцип.

5. Обработка измерительной информации и управление процессом измерения при применении многомерных многощуповых средств измерений с помощью встроенного микропроцессора или автономного компьютера.

6. Использование информации, генерируемой электроконтактными измерительными преобразователями, образующими многощуповую измерительную головку, для управления считыванием измерительной информации с отсчетных цифровых измерительных преобразователей, фиксирующих относительные перемещения измерительной головки и контролируемой детали.

Очевидно, что реализация трех последних принципов необходима для автоматизации измерений, выполняемых с помощью многомерных средств измерений.

7. Аналитическая компенсация погрешности относительного перемещения многощуповой измерительной головки и объекта измерения.

Суть этого принципа заключается в использовании измерительной информации, поступающей с отсчетных цифровых измерительных преобразователей, для определения реального расположения многощуповой измерительной головки в системе координат прибора и оценки отклонений от номинального расположения. Определяемые таким образом отклонения в момент срабатывания какого-либо из электроконтактных измерительных преобразователей многощуповой измерительной головки служат основой для аналитического определения поправок на дополнительное смещение чувствительного элемента преобразователя из-за погрешности перемещения измерительной головки. Использование этого принципа дает возможность сделать более свободными требования к точности перемещения многощуповой измерительной головки (а также требования к точности направляющих).

8. Оптимизация количества чувствительных модулей (электроконтактных измерительных преобразователей) многощуповых измерительных головок.

В основе реализации этого принципа лежит оптимизация числа контролируемых точек реальных поверхностей деталей, результатом которой является максимальное сокращение числа точек без существенного риска увеличения погрешности измерений. Итогом такой оптимизации будет упрощение конструкций многомерных средств измерений и их удешевление.

9. Использование программного обеспечения, позволяющего осуществлять аналитическую трансформацию системы координат множества контролируемых точек объекта измерения с помощью встроенного микропроцессора или автономного компьютера.

Целью такой трансформации системы координат является ее оптимизация и, как результат, уменьшение методической погрешности из-за несовпадения систем координат детали и средства измерения.

Рассмотренные принципы построения специальных многомерных координатных средств измерений модульного типа позволяют представить общую структуру таких средств измерений (рис. 5.2) в виде комплекса следующих элементов (модулей):

- модуль базирования;
- $1 \dots j$ многощуповых измерительных головок с i измерительными преобразователями в каждой;
- $1 \dots j$ центрирующих приспособлений;
- $1 \dots j$ приводов измерительных перемещений;
- $1 \dots j$ отсчетных измерительных преобразователей перемещения;
- электронный блок обработки измерительных сигналов.

Основным функциональным модулем любого многомерного многощупового средства измерения является многощуповая измерительная головка 2, объединяющая в себе некоторую совокупность чувствительных модулей первого уровня (щупов) 1, количество и расположение которых должно конкретизироваться, исходя из решаемой измерительной задачи. Поэтому саму многощуповую измерительную головку можно рассматривать как чувствительный модуль второго уровня.

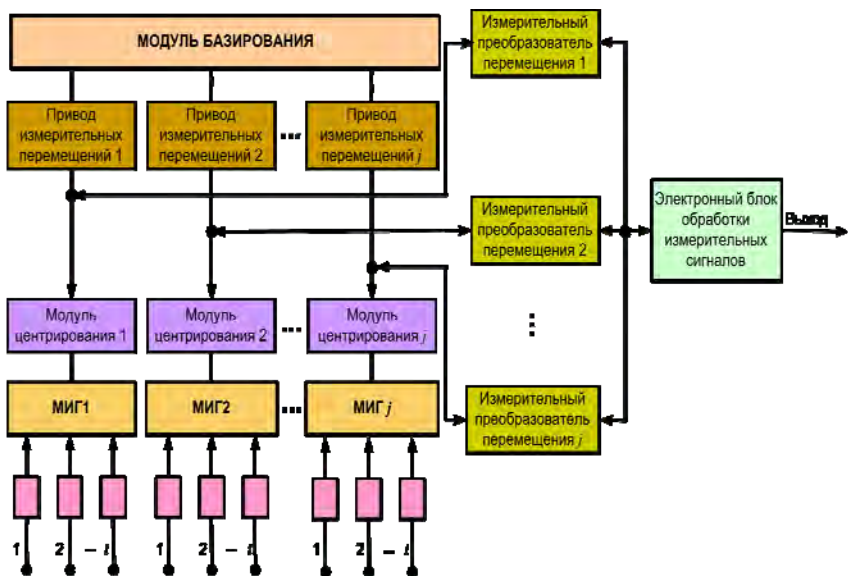


Рисунок 5.2 – Обобщенная структурная схема СМСИ

Конструкция такой измерительной головки должна обеспечивать возможность установки чувствительных модулей первого уровня (щупов), их быструю замену, изменение количества и расположения в широких пределах.

Все перемещения многощуповой измерительной головки, осуществляемые в процессе выполнения измерений, фиксируются одним или несколькими измерительными модулями 3, в качестве которых выступают отсчетные средства измерений (измерительные преобразователи). Количество и расположение измерительных модулей определяется количеством реализуемых направлений измерительных перемещений данным средством измерения, а также используемым алгоритмом аналитической компенсации погрешности относительного перемещения многощуповой измерительной головки и контролируемой детали. Ориентацию и закрепление измерительного модуля (модулей) на контрольной позиции обеспечивает модуль базирования.

Фиксация момента контакта чувствительного элемента каждого из щупов (чувствительных модулей первого уровня) с поверхностью объекта измерения осуществляется электронным блоком обработки измерительных сигналов. Этот модуль в процессе выполнения измерений производит непрерывное сканирование (опрос) чувствительных модулей первого уровня (щупов) и в момент срабатывания какого-либо из них выдает управляющий сигнал на считывание выходной информации с измерительного модуля (модулей). Все необходимые измерительные перемещения многощуповой измерительной головки и объекта измерения реализуются с помощью модулей вспомогательных (установочных) и измерительных перемещений. В общем случае каждый такой модуль должен включать привод (электромеханический, гидравлический, пневматический и др.), механизм преобразования движения (например, вращательного в поступательное с помощью кинематической передачи типа «винт-гайка» и др.), а также направляющие (скольжения, качения, пружинные, такие как, например, плоскопружинный параллелограмм или плоскопружинный крестообразный шарнир и др.). При этом следует отметить, что изменение взаимного расположения многощуповой измерительной головки и объекта измерения может осуществляться как за счет перемещения самой головки, так и за счет перемещения вместе с модулем базирования, служащим для ориентирования и закрепления объекта измерения на измерительной позиции. В качестве модулей базирования могут выступать как стандартизованные, так и оригинальные (нестандартизованные) центра, призмы и столы, планшайбы с необходимыми фиксирующими элементами (механическими зажимами, пневмоприхватами и др.). Измерительная информация, генерируемая в процессе работы специального многомерного многощупового средства измерения, поступает на вход модуля обработки измерительных сигналов, где она накапливается, хранится и обрабатывается по соответствующим алгоритмам, а результат такой обработки выдается в установленной форме на устройство отображения измерительной информации (цифровое табло, дисплей, самопишущее или цифропечатающее устройст-

во и др.). Данный модуль осуществляет также управление работой отдельных функциональных элементов рассматриваемых средств измерений. Функции этого модуля могут выполнять либо автономный компьютер соответствующего уровня, либо специализированный встроенный микропроцессор.

Следует отметить, что рассмотренная выше структурная схема является обобщенной. В конкретных средствах измерения такого типа могут отсутствовать отдельные функциональные модули, или они могут иметь некоторые специфические особенности не влияющие, на основополагающие принципы построения и функционирования таких средств измерения.

Все структурные элементы СМСИ в той или иной степени оказывают влияние на его метрологические характеристики.

Исходя из обобщенной структурной схемы СМСИ его функцию преобразования можно представить в следующем виде:

$$Q = f(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}, x_j, y_j, z_j, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \alpha_j, \varepsilon_t) \quad (5.1)$$

где $x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}$ – координаты измерительного наконечника i -го первичного преобразователя j -той МИГ СМСИ; x_j, y_j, z_j – линейные координаты j -той МИГ СМСИ; $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ – угловые координаты j -той МИГ СМСИ; ε_t – временная инерционность измерительного тракта СМСИ.

Фактором, оказывающим определяющее влияние на конфигурацию СМСИ, является конструктивное исполнение МИГ и, в частности, вид применяемых измерительных преобразователей (щупов). В зависимости от принципа действия различают зависимые и независимые щупы.

Зависимые щупы передают измерительное перемещение через промежуточный интегрирующий узел к отсчетному устройству. При такой схеме работы интегрирующее звено дает «суммарный» сигнал всех щупов.

Структурная схема СМСИ с зависимыми измерительными преобразователями представлена на рис. 5.3.

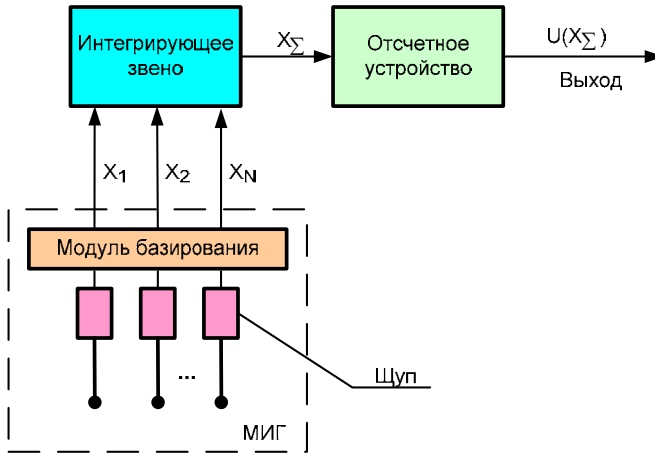


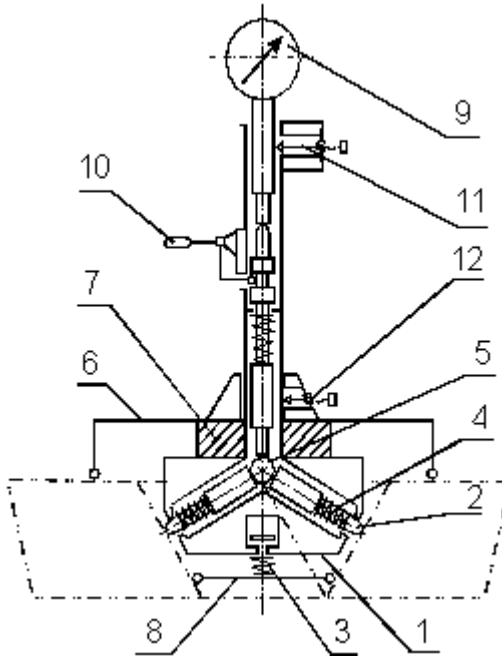
Рисунок 5.3 – Структурная схема СМСИ с зависимыми щупами

Обобщенная передаточная характеристика СМСИ с зависимыми щупами имеет следующий вид:

$$Q = f(\sum x_i) \quad (5.2)$$

Примерами СИ, в которых реализовано такое конструктивное исполнение щупов, являются СМСИ радиуса и отклонения центра внутренних сферических элементов деталей, внедренное на ОАО «Минский автомобильный завод» и СМСИ параметров внутренних номинально конических элементов деталей (рис. 5.4). [66, 67]

Измерения с помощью данного СМСИ осуществляются методом сравнения с мерой, для чего оно настраивается на ноль по специальной образцовой (эталонной) мере, выполненной в виде конуса с переменной конусностью, что обеспечивает возможность настройки на разные номинальные конусности. После настройки по мере измерительное устройство устанавливают на контролируемую деталь таким образом, чтобы его базировочное приспособление плотно прилегало к контролируемой конической поверхности детали, а измерительные наконечники упирались в контролируемую поверхность.



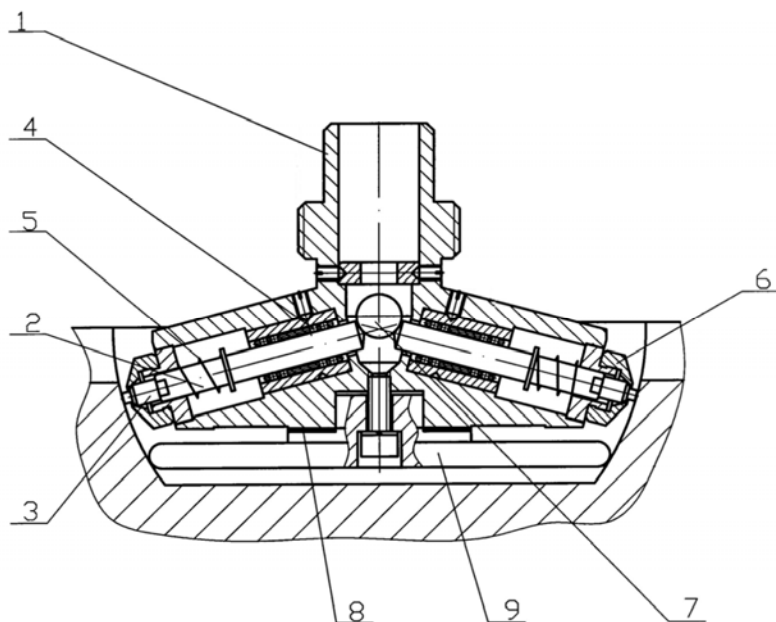
1 – корпус; 2 – измерительный наконечник; 3,4 – пружины; 5 – шарик;
 6 – базисующий мостик; 7 – узел крепления базисующего мостика;
 8 – центрирующий мостик; 9 – измерительный преобразователь перемещения;
 10 – арретир; 11 – стопорный винт.

Рисунок 5.4 – Схема СМСИ с зависимыми щупами (на примере СИ параметров номинально конических элементов деталей)

При отклонении радиуса окружности, образованной в определенном сечении конической поверхности, от номинального, измерительные наконечники переместятся в радиальном направлении. Возникающее перемещение измерительных наконечников посредством «плавающего» шарика передается измерительному стержню и преобразуется измерительным преобразователем перемещения.

Конструкция МИГ рассматриваемого СМСИ приведена на рис. 5.5. МИГ состоит из корпуса 1, в котором установлены три подвижных, подпружиненных измерительных стержня 2,

имеющих возможность осевого перемещения в точных направляющих качения 4, причём ось каждого измерительного стержня направлена по нормали к измеряемой поверхности, т.е. по её радиусу, а угол между проекциями осей измерительных стержней на плоскость, перпендикулярную оси СМСИ, равен 120° . Измерительные стержни в рассматриваемом СМСИ являются зависимыми щупами.



1 – корпус; 2 – стержень измерительный; 3 – наконечник измерительный; 4 – направляющие качения; 5 – пружина; 6 – колпачок; 7 – шарик передаточный; 8 – шайба юстировочная; 9 – мостик центрирующий

Рисунок 5.5 – Конструкция МИГ СМСИ с зависимыми щупами (на примере СИ параметров номинально конических элементов деталей)

Независимые щупы представляют собой СИ низкого уровня, осуществляющие измерение перемещения или положения чувствительного элемента – измерительного наконечника. В основу работы независимых щупов положены аналоговые и дискретные

электрические явления, исходя из чего, их разделяют на две большие группы: щупы непрерывного и дискретного действия. Принципы использования этих видов измерительных преобразователей в составе СМСИ существенно отличаются [68].

Щупы непрерывного действия при работе СМСИ измеряют перемещения их чувствительных элементов, контактирующих с контролируемой деталью. Структурная схема СМСИ с использованием щупов непрерывного действия приведена на рис. 5.6. В данном случае перемещение многощуповой измерительной головки может отсутствовать, а сама головка может устанавливаться непосредственно на контролируемую поверхность детали. При этом соблюдается принцип Аббе и в результирующую погрешность измерения не вносится дополнительная составляющая методической погрешности.

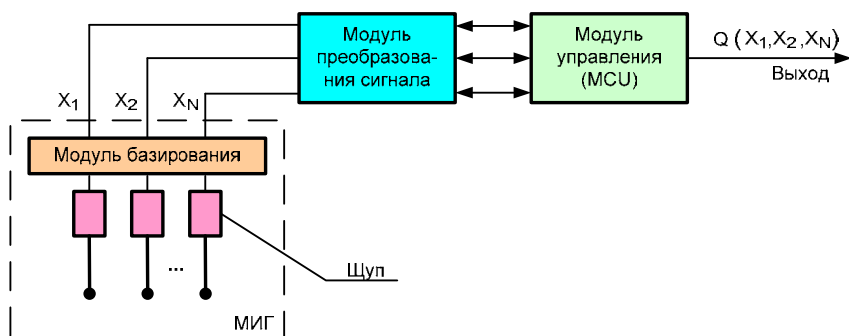


Рисунок 5.6 – Структурная схема СМСИ с независимыми щупами непрерывного действия

Измерительные сигналы X_1, X_2, \dots, X_N , содержащие информацию о перемещении измерительных наконечников, поступают от щупов на модуль преобразования сигнала, где они нормируются и, при необходимости, оцифровываются. Затем нормированные сигналы поступают на модуль управления, где реализуется расчет координат точек касания измерительных наконечников с контролируемой поверхностью и производится аналитическая компенсация некоторых составляющих погреш-

ности измерения. Выходной сигнал $Q(X_1, X_2, \dots, X_N)$ выдается на индикацию либо в персональный компьютер для дальнейшей обработки, архивирования данных и т.д.

Учитывая, что МИГ базируется непосредственно на объекте измерения, отсутствует необходимость определять ее положение в пространстве. В связи с этим в конструкциях СИ, построенных в соответствии с рассматриваемой схемой, отсутствуют измерительные преобразователи перемещения самой МИГ.

В отличие от щупов непрерывного действия, дискретные измерительные преобразователи в составе СМСИ используются для фиксации момента контакта их измерительных наконечников с контролируемой поверхностью детали при измерительном перемещении МИГ в выбранном направлении (рис. 5.7).

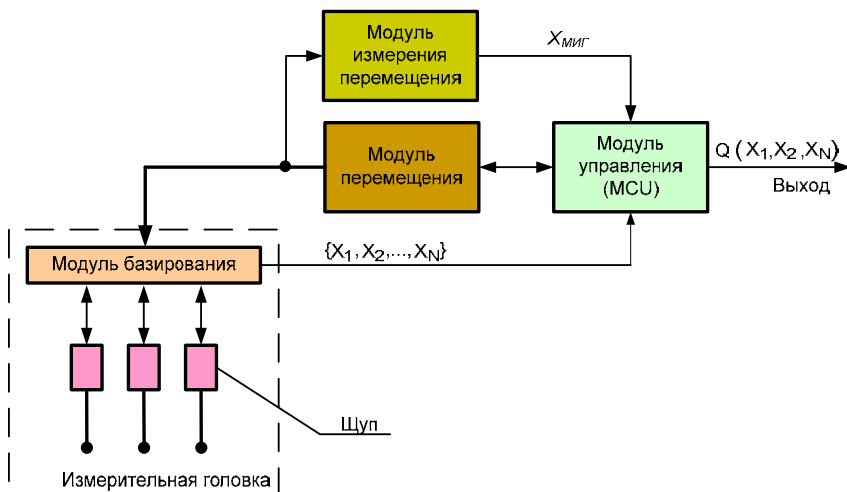


Рисунок 5.7 – Структурная схема СМСИ с независимыми щупами дискретного действия

В данном случае измерительные преобразователи выполняют функцию нуль-индикаторов контакта (реализуется нулевой метод измерения каждой из координат). При перемещении МИГ каждый из дискретных щупов срабатывает в определенный мо-

мент времени, определяющий положение всей головки, а, следовательно, и координат точки касания.

Преобразователи дискретного действия могут обеспечивать значительные перебеги при измерительном перемещении МИГ. Важность этого свойства объясняется тем, что работа СМСИ предусматривает последовательное срабатывание ряда щупов при перемещении МИГ в выбранном направлении, а значит, срабатывание одного из щупов не должно мешать дальнейшему перемещению МИГ.

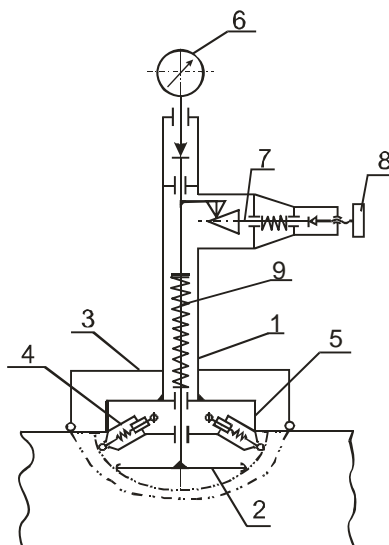
Обобщенная передаточная характеристика СМСИ с независимыми щупами дискретного действия имеет следующий вид:

$$Q = f(x_j, y_j, z_j, \alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \alpha_j, \varepsilon_t) \quad (5.3)$$

где x_j, y_j, z_j – линейные координаты j -й МИГ СМСИ в момент фиксации касания; $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j$ – угловые координаты j -й МИГ СМСИ в момент фиксации касания; ε_t – временная инерционность измерительного тракта СМСИ.

Примером реализации СМСИ с независимыми щупами дискретного действия является СМСИ измерения геометрических параметров сферических элементов детали, схема которого приведена на рис. 5.8.

При выполнении измерений при помощи данного СМСИ его МИГ 5 перемещается в вертикальном направлении посредством механизма тонких перемещений 7. Центрирование СМСИ осуществляется посредством центрирующего мостика 2, плотно прилегающего к контролируемой поверхности. Координаты МИГ измеряются преобразователем перемещения 6 и фиксируются в момент поступления сигнала о касании чувствительного элемента какого-либо щупа дискретного действия с контролируемой поверхностью.



- 1 – корпус; 2 – центрирующий мостик; 3 – опорный мостик;
 4 – электроконтактный щуп дискретного действия, работающий на размыкание;
 5 – МИГ; 6 – преобразователь перемещения многощуповой головки;
 7 – механизм тонких перемещений; 8 – микровинт; 9 – пружина.

Рисунок 5.8 – Схема СМСИ с независимыми щупами дискретного действия (на примере СИ параметров номинально сферических элементов деталей)

Исходя их геометрии МИГ определяется фактическая координата контролируемой поверхности. При этом устройством обработки измерительной информации может вноситься автоматическая компенсация некоторых составляющих погрешности. Таким образом, например, может быть скомпенсирована неопределенность точки контакта чувствительного элемента с контролируемой поверхностью.

Проведенный анализ показывает, что основными конструктивными элементами, определяющими метрологические характеристики СМСИ, являются щупы и базирующие приспособления. Базирующие приспособления, определяющие пространст-

венное расположение щупов, проектируются непосредственно для решения каждой конкретной измерительной задачи. В то же время щупы могут быть универсальными и различаться только унифицированными техническими характеристиками. Принимая во внимание множество физических принципов, которые могут быть реализованы в конструкциях щупов, рассмотрим их классификацию и типовые конструктивные исполнения.

5.3 Метрологическое моделирование специальных средств для операционного контроля геометрических параметров деталей

Целью моделирования специальных средств для операционного контроля геометрических параметров деталей является обеспечение расчетным путем на стадии проектирования требуемых показателей качества рассматриваемых СМСИ. Основным показателем качества любого СИ следует считать инструментальную погрешность измерения, включающую для выделенной группы СИ погрешность одного или нескольких «отсчетных» измерительных преобразователей, предназначенных для фиксации положения МИГ по одной или нескольким координатам, погрешность МИГ и неопределенность позиционирования МИГ, а также измерительного преобразователя относительно устройства базирования объекта контроля (контролируемой детали).

Методика моделирования СИ основана на известных методиках расчета точности механизмов измерительных приборов, изложенных в работах [69,70].

Погрешность МИГ является интегральной и включает в себя такие составляющие как погрешность аттестации положения чувствительных элементов щупов в составе МИГ и погрешность индикации контакта каждого измерительного наконечника с контролируемой поверхностью детали (погрешность срабатывания щупов).

Ключевым элементом исходных данных для решения поставленной задачи является допустимая инструментальная погрешности $[\Delta_n]$ и структурная схема проектируемого СИ.

Процедура метрологического моделирования начинается со структурирования проектируемого СМСИ в виде иерархической информационной «пирамиды». Такую «пирамиду» для рассматриваемой группы СИ в наиболее общем виде можно представить следующим образом (рис. 5.9).

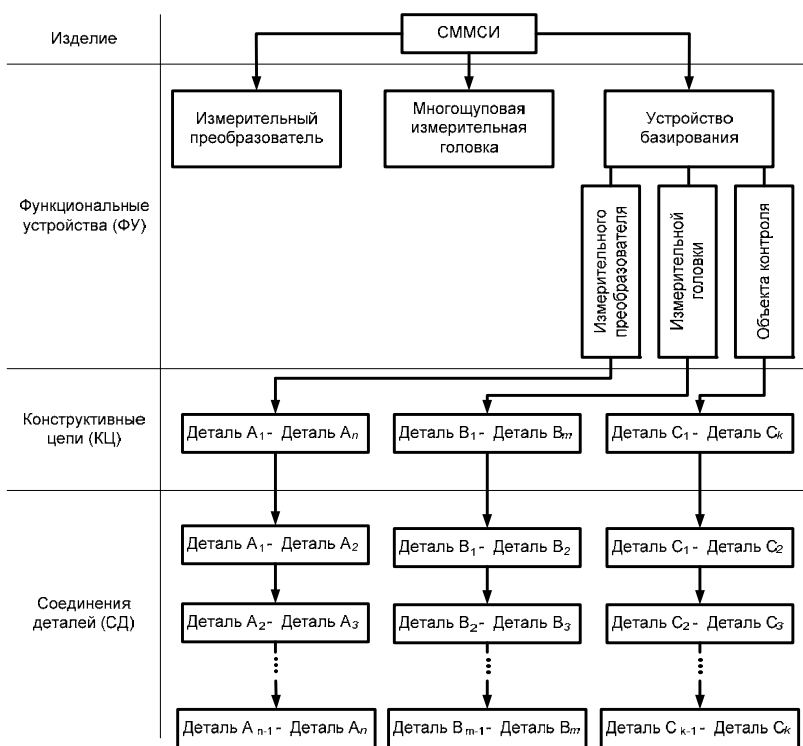


Рисунок 5.9 – Структура проектируемого СМСИ в виде иерархической информационной «пирамиды»

После структурирования СМСИ в виде иерархической информационной «пирамиды» необходимо решить следующую

задачу: распределить допустимую инструментальную погрешность измерения $[\Delta_{и}]$ между комплексными показателями качества составляющих функциональных устройств (ФУ). Из информации, представленной в иерархической информационной «пирамиде» следует, что необходимо распределить заданный показатель качества СИ между следующими ФУ: измерительным преобразователем, МИГ, устройством базирования контролируемой детали, измерительного преобразователя и МИГ.

Тогда уравнение такого распределения в соответствии с вероятностным методом и с учетом коэффициента запаса k_3 ($k_3 = 1,3 \dots 1,5$) будет иметь следующий вид:

$$\frac{[\Delta_{и}]}{k_3} = \sqrt{C_1^2 \cdot \Delta_{\PhiУ1}^2 + C_2^2 \cdot \Delta_{\PhiУ2}^2 + C_3^2 \cdot \Delta_{\PhiУ3}^2}, \quad (5.4)$$

где C_1 , C_2 и C_3 – коэффициенты влияния, которые в данном случае, очевидно, равны единице.

Так как ФУ1 – «отсчетный» измерительный преобразователь, являющийся в подавляющем большинстве случаев серийно выпускаемым СИ, то $\Delta_{\PhiУ1}$ будет равна основной погрешности данного измерительного преобразователя, указанной в его паспорте.

Что касается погрешности $\Delta_{\PhiУ2}$, то она также является известной величиной, определяемой по результатам аттестации МИГ.

Следовательно, записанное выражение является уравнением с одной неизвестной величиной $\Delta_{\PhiУ3}$, характеризующей инструментальную погрешность, вносимую устройством базирования СИ. На основании этого уравнения погрешность $\Delta_{\PhiУ3}$ можно выразить следующим образом:

$$\Delta_{\PhiУ3} = \sqrt{\frac{\Delta_{и}}{k_3^2} C_1^2 \cdot \Delta_{\PhiУ1}^2 + C_2^2 \cdot \Delta_{\PhiУ2}^2 + \frac{1}{C_3^2}}. \quad (5.5)$$

После определения инструментальной составляющей погрешности измерения $\Delta_{\PhiУ3}$, вносимой устройством базирования СИ, необходимо распределить найденный показатель качества данного функционального устройства между показателями ка-

чества соответствующих конструктивных цепей таким образом, чтобы обеспечивалось соотношение $\Delta_{\Phi y_3} \leq [\Delta_{\Phi y_3}]$. Очевидно, что в данном случае имеют место три конструктивные цепи, характеризующие неопределенность положения рабочих элементов ФУ относительно базирующего элемента СИ по шести степеням свободы. Однако рационально свести их в одну конструктивную цепь для упрощения решения поставленной задачи. Для данной конструктивной цепи можно записать:

$$\Delta z_{\Sigma} = C_1 \cdot \Delta \varphi_x + C_2 \cdot \Delta \varphi_y + C_3 \cdot \Delta \varphi_z + C_4 \cdot \Delta x + C_5 \cdot \Delta y; \quad (5.6)$$

$$\Delta z_{\Sigma} = C_1 \cdot \Delta \varphi_x + C_2 \cdot \Delta \varphi_y + C_3 \cdot \Delta \varphi_z + C_4 \cdot \Delta x + C_5 \cdot \Delta z; \quad (5.7)$$

$$\Delta z_{\Sigma} = C_1 \cdot \Delta \varphi_x + C_2 \cdot \Delta \varphi_y + C_3 \cdot \Delta \varphi_z + C_4 \cdot \Delta x + C_5 \cdot \Delta z. \quad (5.8)$$

где Δz_{Σ} , Δz_{Σ} , Δz_{Σ} – инструментальные составляющие погрешности измерения, вносимые устройством базирования СИ при выполнении измерений в направлении координатных осей Ox , Oy и Oz соответственно; $\Delta \varphi_x$, $\Delta \varphi_y$, $\Delta \varphi_z$ – неопределенности положения, вызванные перекосом (поворотом) относительно осей Ox , Oy и Oz соответственно; Δx , Δy , Δz – неопределенности положения вдоль осей Ox , Oy и Oz соответственно; C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 – коэффициенты влияния соответствующих комплексных неопределенностей. Для выявления действующих комплексных неопределенностей удобно применить экспертный метод оценки с использованием матрицы влияния.

Положение точки M_i в системе координат (x, y, z) будем задавать радиус-вектором координат \vec{M}_i . Поворот точки M_i относительно начала координат описывается уравнением

$$\vec{M}_j = L \vec{M}_i \quad (5.9)$$

где \vec{M}_j – вектор-столбец координат нового положения, L – матрица вращения.

Матрица вращения L приведена в работе

После выявления действующих комплексных неопределенностей и нахождения, соответствующих им коэффициентов влияния C_i производят распределение погрешности $[\Delta_{\text{ФУЗ}}]$ между действующими комплексными неопределенностями, исходя из условия:

$$[\Delta_{\text{ФУЗ}}] = \Delta_{\text{ФУЗ}} = \Delta X_{\Sigma} = \Delta Y_{\Sigma} = \Delta Z_{\Sigma}. \quad (5.10)$$

5.4 Классификация и конструктивные исполнения щупов СМСИ

Все применяемые в составе СМСИ щупы можно разделять на зависимые и независимые, последние в свою очередь разделяются на щупы непрерывного и дискретного действия. И та и другая классификационные группы имеют множество реализаций, основанных на различных физических принципах [71]. Щупы непрерывного действия представляют собой универсальные преобразователи перемещения либо положения.

При работе многомерного средства измерения непосредственно измеряются перемещения их чувствительных элементов, контактирующих с контролируемой деталью и алгебраически складываются с результатами измерений отсчетного измерительного прибора или преобразователя, фиксирующего перемещение многощуповой измерительной головки по соответствующей координате (дифференциальный метод измерения координат). В более простом варианте перемещение многощуповой измерительной головки может отсутствовать, сама головка устанавливается непосредственно на контролируемую поверхность детали. В этом случае отдельные измерительные преобразователи многощуповой измерительной головки будут непосредственно измерять координаты соответствующих точек контролируемой поверхности детали. Следует отметить, что щупы непрерывного действия допускают значительные перебеги при перемещении многощуповой измерительной головки. Важность этого свойства объясняется тем, что работа многомерного средства измерения предусматривает последовательное срабатывание ряда измерительных преобразова-

телей при перемещении многощуповой измерительной головки в одном выбранном направлении. Следовательно, срабатывание одного из преобразователей не должно быть помехой дальнейшему перемещению измерительной головки.

К недостаткам рассматриваемого варианта реализации многомерных средств измерений на базе щупов непрерывного действия можно отнести сложность их конструкции и относительно высокую себестоимость.

Дискретные измерительные преобразователи в составе многомерного средства измерения используются для фиксации момента контакта их чувствительных элементов (щупов) с контролируемой поверхностью детали при измерительном перемещении многощуповой измерительной головки в выбранном направлении. В данном случае измерительные преобразователи выполняют функцию нуль-индикаторов контакта (реализуется нулевой метод измерения координат).

5.5 Конструкции и принципы действия чувствительных модулей (щупов) специальных многомерных многощуповых средств измерений

Чувствительные модули или щупы являются одними из наиболее ответственных элементов многощуповых измерительных приборов. Они предназначены для фиксирования положений контролируемых точек деталей при координатных измерениях их геометрических параметров. Исходя из назначения и условий использования чувствительных модулей, можно выделить следующие основные требования, которым они должны удовлетворять.

Такие модули, прежде всего, должны обеспечивать высокую точность и надежность фиксирования положений контролируемых точек, иметь минимальные габаритные размеры и массу, простую конструкцию и невысокую себестоимость изготовления. Кроме того, для обеспечения необходимой автоматизации процесса измерения каждый чувствительный модуль должен фиксировать положение контролируемой точки при «ощупывании» детали его чув-

ствительным элементом с выработкой электрического сигнала требуемого уровня (достаточного для его регистрации).

С учетом сформулированных требований были разработаны индуктивный щуп непрерывного действия и серия специальных предельных электроконтактных измерительных преобразователей, предназначенных для использования в качестве чувствительных модулей (щупов) в многощуповых измерительных приборах.

На рис. 5.10 представлена схема индуктивного щупа непрерывного действия.

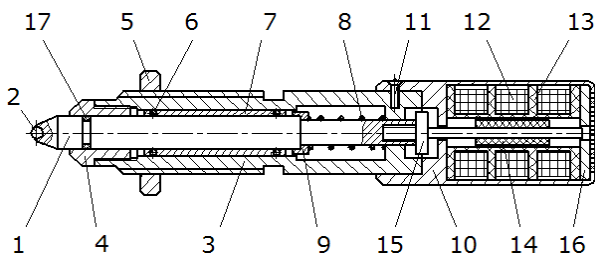


Рисунок 5.10 – Индуктивный щуп непрерывного действия

Измерительный шток 1 перемещается в корпусе 3 на шариках 6, размещенных в сепараторе 7. Шарик 2, завальцованный в измерительном штоке 1, контактирует с контролируемой поверхностью. Втулка 4, в сочетании с уплотнителем 17, защищает внутреннее пространство щупа от попадания пыли. Контргайка 5 предназначена для фиксации щупа в процессе предварительной настройки. Измерительный шток 1 поджат пружиной 8 через тарелку 9 (на рисунке 4.8 показано нейтральное положение штока 1, при котором осуществляется настройка системы «на ноль»).

К корпусу 3 винтами 11 крепится корпус 10 электромагнитного преобразователя, основой которого являются катушки 12, намотанные на каркасе 13, а также ферромагнитный сердечник 14, соединенный с измерительным штоком 1 при помощи стержня 15, выполненного из диамагнитного материала. Каркас 13 и крышка 16 завальцованы в корпусе 10.

В рассматриваемой конструкции щупа в качестве преобразователя перемещений в электрический измерительный сигнал

использован линейный дифференциальный трансформатор (ЛДТ), который, при относительной простоте конструкции, позволяет получить высокие значения характеристик, таких, как линейность, чувствительность, стабильность показаний.

Электроконтактный щуп дискретного действия выполняет функцию нуль-индикатора контакта при с контролируемой деталью в заданной точке. Разработанные измерительные преобразователи отличаются принципом действия, конструктивным исполнением, функциональными возможностями и имеют различные области применения.

По принципу действия все преобразователи рассматриваемого типа можно разделить на две группы:

1) преобразователи, фиксирующие положения контролируемых точек по электрическому замыканию контактной пары «чувствительный элемент преобразователя – контролируемая деталь» (преобразователи, срабатывающие на «замыкание»);

2) преобразователи, фиксирующие положения контролируемых точек по электрическому размыканию специальной контактной пары, находящейся внутри преобразователя, и не связанной непосредственно с контролируемой деталью (преобразователи, срабатывающие на «размыкание»).

Очевидно, что преобразователи первой группы могут использоваться для оснащения ими многощуповых измерительных приборов, предназначенных для измерения геометрических параметров только электропроводных деталей, а преобразователи второй группы имеют область применения, охватывающую как электропроводные, так и неэлектропроводные детали.

По своим функциональным возможностям все разработанные измерительные преобразователи подразделяются на три группы:

1) преобразователи осевого действия, направление измерительного перемещения которых в многомерном (многощуповом) средстве измерения должно совпадать с направлением их осей;

2) преобразователи бокового действия, измерительное перемещение которых должно осуществляться в направлении, перпендикулярном направлению их осей;

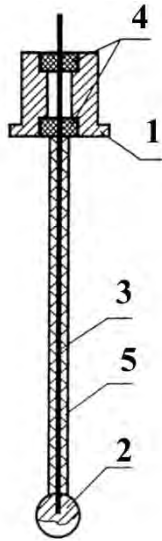
3) универсальные преобразователи, измерительное перемещение которых может осуществляться как в направлении, совпадающем с направлением их осей, так и в направлении, перпендикулярном их осевому направлению.

Очевидным является факт, что преобразователи, входящие в первую группу, могут использоваться только в однокоординатных измерительных приборах, преобразователи второй группы – в одно- и двухкоординатных. Что же касается преобразователей, образующих третью группу, то их без ограничений можно применять в одно-, двух- и трехкоординатных приборах рассматриваемого типа.

Простейшим представителем серии разработанных специальных электроконтактных измерительных преобразователей является преобразователь мод.2ИПЭ-1, представленный на рис. 5.11. По выделенным выше классификационным признакам данный преобразователь относится к преобразователям бокового действия, работающим на «замыкание», и предназначен для оснащения одно- и двухкоординатных многощуповых средств измерения (приборов) геометрических параметров электропроводных деталей. Его конструкция включает корпус 1, сферический чувствительный элемент (шарик) 2, закрепленный на гибком стержне 3, две опоры 4 и демпфер 5.

Важной особенностью рассматриваемого преобразователя является то, что в качестве его чувствительного элемента используется шарик из специального электропроводного немагнитного материала (сплава 38НХТЮ5М ГОСТ 10994-74), характеризующегося высокой твердостью и электроэрозионной стойкостью.

При исследовании функциональных возможностей преобразователя с чувствительным элементом в виде стального шарика оказалось, что погрешности фиксирования данным преобразователем положений контрольных точек деталей из магнитных и немагнитных материалов существенно отличаются. На основании экспериментальных данных была выдвинута гипотеза о влиянии магнитных свойств чувствительного элемента преобразователя на погрешность фиксирования им положений контрольных точек деталей из магнитных материалов.



1 – корпус; 2 – сферический чувствительный элемент;
3 – стержень; 4 – опоры; 5 – демпфер

Рисунок 5.11 – Измерительный преобразователь мод. 2 ИПФ – 1

Для проверки этой гипотезы были проведены дополнительные исследования, в результате которых было выяснено, что магнитный материал шарика (сталь) приводит к значительному увеличению погрешности фиксирования положений точек деталей из магнитных материалов из-за притягивания («прилипания») шарика, подвешенного на тонком, гибком стержне, к поверхности детали.

С учетом полученных результатов экспериментальных исследований было решено выделить две модификации рассматриваемого измерительного преобразователя:

1) преобразователь мод. 2ИПЭ-1М с чувствительным элементом (шариком) из электропроводного магнитного материала (стали), предназначенный для измерения деталей только из электропроводных немагнитных материалов (например, алюминия, меди и др.);

2) преобразователь мод. 2ИПЭ-1Н с чувствительным элементом (шариком) из электропроводного немагнитного материала,

предназначенный для измерения деталей из электропроводных как магнитных, так и немагнитных материалов.

Поскольку рассматриваемый измерительный преобразователь является преобразователем бокового действия, то его важным функциональным параметром является допускаемое смещение («подвижность») чувствительного элемента (шарика) в поперечном направлении. Очевидно, что при такой конструкции преобразователя «подвижность» его чувствительного элемента в направлении, перпендикулярном его оси, зависит от упругих свойств гибкого стержня, на котором установлен чувствительный элемент. Исходя из этого, для изготовления такого стержня было решено использовать проволоку ($d = 0,6 \dots 1,2$ мм) из бериллиевой бронзы БрБНТ 1,9 ГОСТ 18175-78, характеризующейся высокими упругими свойствами. Использование такого материала в конструкции рассматриваемого измерительного преобразователя для подвески чувствительного элемента позволило существенно расширить пределы его допускаемого смещения (до 10 мм) в направлении (направлениях) измерительного перемещения.

При использовании совокупности таких преобразователей в многощуповых измерительных приборах «подвижность» их чувствительных элементов в направлении (направлениях) измерительного перемещения многощуповой головки позволяет компенсировать:

а) технологические погрешности расположения чувствительных элементов (погрешности изготовления и монтажа отдельных модулей);

б) разноразмерность одновременно измеряемых координат множества контролируемых точек детали, подлежащей контролю;

в) «перебег» измерительной многощуповой головки, т.е. избыточное перемещение головки после срабатывания последнего измерительного преобразователя до ее полной остановки.

Чем меньше «подвижность» чувствительных элементов преобразователей, тем более жесткие требования должны накладываться на компенсируемые за счет смещения чувствительных элементов факторы, т.е. тем меньше должны быть диапазоны их допускаемого изменения. Наиболее негативное влияние оказывает ужесточение требований к «перебегам» измерительной головки, особенно для автоматизированных многощуповых

средств измерений с автономным приводом головки (электрическим, пневматическим, гидравлическим и др.).

Важным элементом конструкции рассматриваемого измерительного преобразователя является демпфер 5, выполненный в виде эластичной трубки из поливинилхлоридного пластика 3.31 ТВ 40Т ГОСТ 19034-82, плотно посаженной на гибкий стержень 3. Такой демпфер предназначен для гашения колебаний (автоколебаний) чувствительного элемента преобразователя (шарика), подвешенного на гибком стержне.

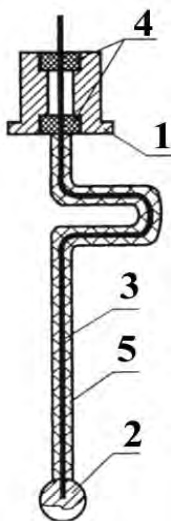
Важной особенностью рассматриваемого измерительного преобразователя является способ крепления гибкого стержня 3, служащего упругой подвеской для чувствительного элемента 2, в корпусе преобразователя 1. Для установки стержня в корпус в качестве опор 4 использованы два приборных (часовых) камня Рубин-10-2 ГОСТ 22029-76. Такие опоры характеризуются высокой прочностью и твердостью, являются диэлектриками и позволяют надежно изолировать электропроводный стержень от корпуса преобразователя.

В составе измерительного прибора описанный выше измерительный преобразователь мод. 2ИПЭ-1 работает следующим образом. Его электропроводный чувствительный элемент (шарик) 2 и гибкий стержень 3 включаются в электрическую измерительную цепь прибора в качестве одного из ее функциональных участков. При этом на чувствительный элемент подается положительный потенциал, а на объект измерения (контролируемую деталь) – отрицательный. При касании чувствительным элементом преобразователя контролируемой поверхности детали в заданной точке происходит замыкание электрической цепи и в ней генерируется электрический сигнал. Сигнал фиксируется блоком индикации контакта, управляющим считыванием измерительной информации с одного или нескольких измерительных приборов или преобразователей линейных перемещений, отслеживающих положение многощуповой измерительной головки. Регистрируемый в момент фиксации контакта сигнал дает возможность определить координаты контролируемой точки детали в системе координат используемого многомерного средства измерения.

Рассмотренный измерительный преобразователь является базовой моделью, на основе которой был разработан ряд преобразова-

телей с таким же составом и принципом действия, но отличающихся своим конструктивным исполнением и функциональными возможностями (возможностью смещения или «подвижностью» чувствительного элемента в различных направлениях, возможностью регулирования его исходного положения и т.д.). В этом ряду наибольший интерес представляют две модели преобразователя рассматриваемого типа: мод.ЗИПЭ-2 и мод.ЗИПЭ-3.

Измерительный преобразователь мод. ЗИПЭ-2 (рис. 5.12) отличается по своему конструктивному исполнению от базовой модели (мод. 2ИПЭ-1) формой гибкого стержня (поз.3), на котором установлен (подвешен) его чувствительный элемент (шарик).



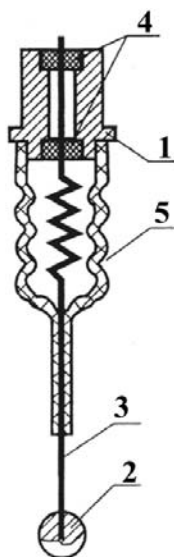
1 – корпус; 2 – сферический чувствительный элемент;
3 – стержень; 4 – опоры; 5 – демпфер

Рисунок 5.12 – Измерительный преобразователь мод. ЗИПЭ-2

В отличие от базовой конструкции преобразователя с прямым гибким стержнем в данной модели используется стержень сложной конфигурации, обеспечивающий «подвижность» чувствительного элемента как в поперечном, так и продольном (осевом) направлениях.

Гибкость стержня в осевом направлении здесь обеспечивает его специальная компенсационная петля (боковой «отвод»), деформирующаяся при силовом воздействии на шарик и его смещении в данном направлении. По своим функциональным возможностям данный измерительный преобразователь относится к группе универсальных преобразователей и его можно использовать в одно-, двух- и трехкоординатных измерительных приборах.

Измерительный преобразователь мод.ЗИПЭ-3 (рис. 5.13) также является универсальным преобразователем, но в отличие от рассмотренной выше модели характеризуется увеличенной «подвижностью» чувствительного элемента (до 20 мм) во всех функционально важных направлениях.



1 – корпус; 2 – сферический чувствительный элемент;
3 – стержень; 4 – опоры; 5 – демпфер

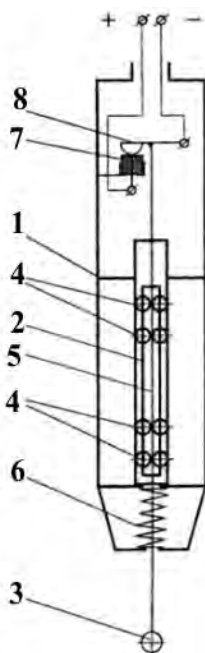
Рисунок 5.13 – Измерительный преобразователь мод. ЗИПЭ-3

Преобразователь имеет более широкие функциональные возможности, что достигается за счет существенного увеличения уп-

ругой деформируемости во всех направлениях гибкого стержня специальной конфигурации (поз. 3), выполняющего роль упругой подвески чувствительного элемента (шарика). Отличительной особенностью гибкого стержня, используемого в этой модели преобразователя, является наличие у него специального компенсирующего звена в виде пружины, упруго деформируемого в широких пределах при силовом воздействии на шарик и его смещении в любом направлении. Деформации компенсационного звена в пределах соблюдения закона Гука, специально подобранный материал гибкого стержня (бериллиевая бронза) обеспечивают высокую точность самовозврата чувствительного элемента (шарика) в исходное положение после снятия нагрузки. Очевидно, что такая подвеска шарика по сравнению с другими вариантами более чувствительна к воздействию вибраций, ударных импульсов и др. факторов, которые могут вызывать его колебания (автоколебания) в направлении (направлениях) измерительного перемещения, приводящие к возрастанию погрешности фиксирования положений контролируемых точек детали. Для повышения эффективности гашения колебаний в рассматриваемой конструкции измерительного преобразователя используется более совершенный по сравнению с другими моделями демпфер 5, выполненный в виде специального силфона из эластичного материала.

Наиболее простым из ряда разработанных измерительных преобразователей, работающих на «размыкание» и предназначенных для измерения геометрических параметров как электропроводных, так и неэлектропроводных деталей, является преобразователь мод. 1ИПНЭ-4 (рис. 5.14).

Он состоит из корпуса 1 цилиндрической формы, посадочный диаметр которого $\varnothing 8h6$, что позволяет устанавливать его не только в специальных многуловых измерительных приборах, но и в стандартных стойках и штативах, предназначенных для крепления универсальных измерительных головок. В корпусе установлен измерительный шток 2, который имеет возможность перемещаться в достаточно широких пределах в осевом направлении.



1 – корпус; 2 – измерительный шток; 3 – чувствительный элемент; 4 – шарики; 5 – сепаратор; 6 – пружина; 7 – неподвижный контакт; 8 – подвижный контакт

Рисунок 5.14 – Измерительный преобразователь мод. 1 ИПНЭ-4

Точное перемещение штока в этом направлении обеспечивается специальными цилиндрическими направляющими качения, включающими точно обработанное отверстие в корпусе 1, тела качения (шарики) 4, размещенные в специальном цилиндрическом сепараторе 5 и сам шток 2. В направляющих используется четыре кольцевых ряда шариков. Особенностью этих направляющих является то, что при их сборке шарики подбираются по размерам таким образом, чтобы в направляющих обеспечивался предварительный гарантированный натяг 4...8 мкм. За счет этого полностью исключается радиальный зазор в направляющих при обеспечении необходимой легкости и плавности перемещения измерительного штока в осевом направлении (направлении

измерительного перемещения). На одном конце измерительного штока установлен сферический чувствительный элемент (шарик) 3, а на другом – подвижный электрический контакт 8, связанный с «массой». В свободном состоянии преобразователя, при отсутствии силового воздействия на чувствительный элемент штока в осевом направлении, этот контакт находится в постоянно замкнутом состоянии с неподвижным электрическим контактом поз.7, установленным в корпусе преобразователя поз.1 и изолированным от него. При подключении преобразователя к электрической цепи многощупового измерительного прибора на его неподвижный контакт подается положительный потенциал. Силовое замыкание контактной пары, а также необходимое измерительное усилие при работе преобразователя обеспечиваются пружиной сжатия 6.

Рассматриваемый измерительный преобразователь относится к группе преобразователей осевого действия и его можно использовать только для оснащения однокоординатных средств измерений. При использовании в составе многощупового измерительного прибора преобразователь совершает измерительное перемещение в осевом направлении. Размыкание электрической цепи фиксируется блоком индикации контакта и в тот же момент осуществляется считывание измерительной информации о пространственном положении многощуповой измерительной головки в системе координат прибора.

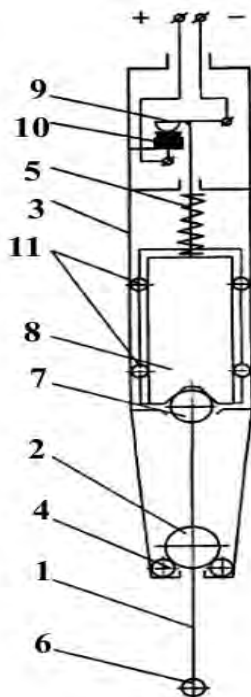
Данный преобразователь допускает достаточно большие «перебеги» чувствительного элемента в направлении измерительного перемещения, что определяется возможностью свободного перемещения измерительного штока в корпусе после размыкания контактной пары.

Следует отметить, что на базе рассмотренного измерительного преобразователя может быть разработан преобразователь, аналогичный по составу и назначению, но работающий на «замыкание» контактной пары. Для этого достаточно разместить

неподвижный изолированный контакт выше над подвижным контактом, установленным на штоке и связанным с «массой». Причем, один из этих контактов должен быть установлен на упругой подвеске, позволяющей за счет ее деформации компенсировать «перебеги» чувствительного элемента в осевом направлении (направлении измерительного перемещения).

Существенным аргументом в пользу такого варианта конструкции измерительного преобразователя является возможность обеспечения более высокой точности фиксации положений контролируемых точек деталей по «замыканию» контактной пары, чем по «размыканию», что было подтверждено экспериментально. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований, это преимущество нивелируется существенным усложнением конструкции измерительного преобразователя, а также более жесткими ограничениями, накладываемыми на «перебег» чувствительного элемента в направлении его измерительного перемещения. Исходя из этого, было принято решение использовать в качестве базовой модели данного типа преобразователей описанный выше измерительный преобразователь с внутренней независимой контактной парой, срабатывающий при ее размыкании. На основе этой базовой модели также был разработан конструктивный ряд преобразователей такого же принципа действия, но существенно отличающихся своим устройством и функциональными возможностями. Рассмотрим типовые конструкции измерительных преобразователей из этого ряда.

Измерительный преобразователь мод.ЗИПНЭ-5 (рис.5.15) по своим функциональным возможностям относится к группе универсальных преобразователей и предназначен для использования в одно-, двух- и трехкоординатных многощуповых измерительных приборах. Конструкция этого измерительного преобразователя отличается от базовой модели (мод.ИПНЭ-4) следующими наиболее важными конструктивными особенностями.



- 1 – измерительный шток; 2 – шаровая опора; 3 – корпус;
 4 – периферийные опоры; 5 – пружина; 6 – чувствительный элемент (шарик);
 7 – толкатель; 8 – ползун; 9 – подвижный электрический контакт;
 10 – неподвижный электрический контакт; 11 – направляющие

Рисунок 5.15 – Измерительный щуп мод. ЗИПНЭ-5

Его измерительный шток 1 в средней части имеет специальную сферическую (шаровую) опору 2, базирующуюся в корпусе преобразователя 3 на шариках меньшего диаметра 4. Эти опорные шарики не связаны друг с другом (сепаратор отсутствует), т.е. являются «плавающими», и под действием шаровой опоры измерительного штока раздвигаются в радиальном направлении на максимально возможное расстояние до упора в базовую внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса преобразователя. При этом постоянное силовое замыкание в такой опоре осуществляется

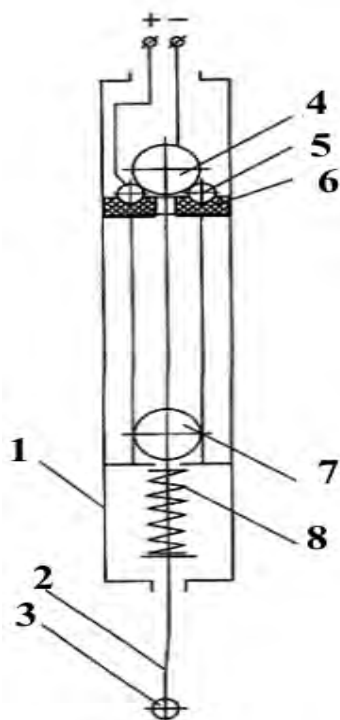
с помощью пружины сжатия 5, которая одновременно служит для создания необходимого измерительного усилия при работе преобразователя. На одном конце измерительного штока установлен сферический чувствительный элемент (шарик) 6, а на другом — шарик 7, называемый толкателем. Сферический толкатель упирается во внутреннюю коническую поверхность ползуна 8, а постоянное силовое замыкание в этой кинематической паре обеспечивается пружиной сжатия 5. Ползун имеет возможность перемещаться в осевом направлении в цилиндрических направляющих качения, конструкция которых аналогична той, что использована в базовой модели преобразователя (мод. ИИПНЭ). С ползуном жестко связан подвижный (плавающий) электрический контакт 9, а неподвижный (изолированный) электрический контакт 10 установлен в корпусе преобразователя 3. Рассматриваемый измерительный преобразователь работает следующим образом.

При силовом воздействии на чувствительный элемент преобразователя в осевом направлении шаровая опора 2 измерительного штока 1 отрывается от опорных шариков 4 и далее шток свободно перемещается вверх по отношению к корпусу преобразователя 3. При этом сферический толкатель штока 7, находящийся в постоянном контакте с внутренней конической поверхностью ползуна 8, смещает ползун по направляющим 11 в осевом направлении. Как только ползун начинает перемещаться вдоль оси преобразователя, происходит размыкание его контактной пары, что и регистрируется блоком индикации контакта.

Измерительный щуп мод.ЗИПНЭ-6 (рис. 5.16) содержит корпус 1 в виде цилиндра, в котором установлен измерительный наконечник 2 с чувствительным элементом 3.

С измерительным наконечником 2 жестко связана центральная опора 4 и направляющий элемент 7. Центральная опора 4 измерительного наконечника 2 базируется в верхней части корпуса 1 на периферийных опорах 5, неподвижно установленных на изолирующей подложке 6, закрепленной в корпусе 1. Изолирующая подложка 6 обеспечивает электрическую изоляцию периферийных опор 5 от корпуса 1. Центральная опора 4 и периферийные опоры 5

образуют три электрические контактные пары (контактную группу), подключаемые к электрической цепи средства измерения.



1 – корпус; 2 – измерительный наконечник; 3 – чувствительный элемент (шарик);
4 – центральная опора; 5 – периферийная опора; 6 – изолирующая подложка;
7 – поправляющий элемент; 8 – пружина

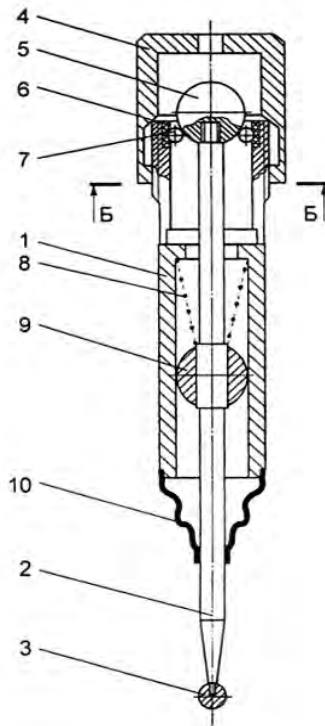
Рисунок 5.16 – Измерительный щуп млд. ЗИПНЭ-6

При этом, на каждую периферийную опору 5 подается положительный потенциал, а центральная опора 4 подключается к отрицательному полюсу источника питания. Силовое замыкание в контактных парах обеспечивается пружиной сжатия 8, которая одновременно служит для создания необходимого измерительного усилия при работе щупа в составе средства измерения. Измерительный наконечник 2 имеет возможность перемещаться в осе-

вом направлении и поворачиваться в любой плоскости, проходящей через его ось.

При силовом воздействии на измерительный наконечник 2 в осевом направлении направляющий элемент 7 начинает перемещаться вдоль продольной оси корпуса 1, вместе с ним начинает перемещаться и центральная опора 4. В момент начала движения центральной опоры 4 происходит электрическое замыкание контактной группы, которую образует центральная опора 4 совместно с тремя периферийными опорами 5. Размыкание контактной группы фиксируется блоком индикации контакта средства измерения.

Измерительный щуп мод. ЗИПНЭ-7 (рис. 5.17) содержит корпус 1, в котором установлен измерительный наконечник 2 с чувствительным элементом 3. С измерительным наконечником 2 жестко связана центральная опора 5 и направляющий элемент 9. Центральная опора 5 измерительного наконечника 2 базируется в верхней части корпуса 1 на периферийных опорах 6, выполненных в виде трех шариков, неподвижно установленных на трех изолирующих подложках 7, закрепленных на соответствующих секторах корпуса. Изолирующие подложки 7 обеспечивают электрическую изоляцию периферийных опор 6 от корпуса 1. Измерительный наконечник 2 имеет возможность перемещаться в осевом направлении и поворачиваться в любой плоскости, проходящей через его ось. Центральная опора 5 и периферийные опоры 6 образуют три электрические контактные пары (контактную группу). При этом, на каждую периферийную опору 6 подается положительный потенциал, а центральная опора 5 подключается к отрицательному полюсу источника питания. Силовое замыкание в контактных парах обеспечивается пружиной сжатия 8, которая одновременно служит для создания необходимого измерительного усилия при работе измерительного щупа в составе средства измерения.



- 1 – корпус; 2 – наконечник; 3 – чувствительный элемент; 4 – крыша;
 5 – центральная опора; 6 – периферийные опоры; 7 – изолирующие подложки;
 8 – пружина сжатия; 9 – направляющий элемент;
 10 – герметизирующий чехол

Рисунок 5.17 – Измерительный щуп мод. ЗИПНЭ-7

Предлагаемая конструкция позволяет расширить функциональные возможности при использовании измерительного щупа в составе многомерных многощуповых средств измерения вследствие обеспечения возможности регулирования положения чувствительного элемента измерительного наконечника щупа при его настройке по образцовой детали или мере, а также увеличения свободного хода чувствительного элемента измерительного наконечника в осевом и поперечном направлениях, уменьшения габаритных размеров устройства.

На рис. 5.18 представлена схема пьезорезонансного щупа, [72] разработанного для оснащения СМСИ.

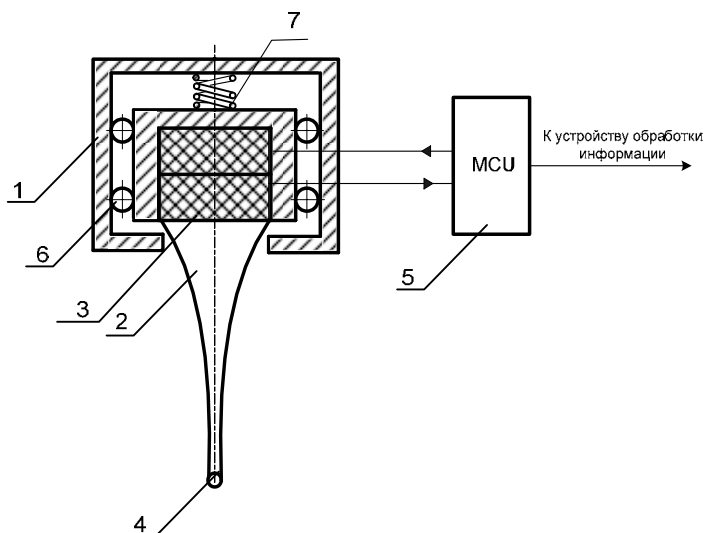


Рисунок 5.18 – Схема пьезорезонансного щупа дискретного действия

Преимуществами данной конструкции являются высокая чувствительность и точность фиксации момента контакта при малом измерительном усилии. Принцип действия пьезорезонансного щупа основан на изменении некоторых динамических параметров его колебательной системы (добротности, резонансной частоты, коэффициента бегущей волны) под действием статической нагрузки или сил трения.

Пьезорезонансный щуп содержит корпус 1, экспоненциальный концентратор ультразвуковых колебаний 2, пьезоэлектрический преобразователь 3, составленный из двух пьезоэлектрических дисков, один из которых является преобразователем энергии, а другой – датчиком амплитуды колебаний, измерительный наконечник 4, микроконтроллер 5, направляющие 6 и пружину 7.

Генератор ультразвуковых колебаний, реализованный на базе микроконтроллера, генерирует переменное электрическое на-

пряжение, подаваемое на пьезокерамический диск пьезоэлектрического преобразователя, выполняющий роль преобразователя энергии. При этом генерируются ультразвуковые колебания, передающиеся концентратору. Пьезоэлектрический преобразователь и концентратор образуют полуволновую колебательную систему, следовательно, свободный торец концентратора с измерительным наконечником находится в пучности колебаний. При касании измерительным наконечником поверхности объекта измерения происходит резкое изменение добротности колебательной системы, изменяется резонансная частота и амплитуда колебаний. Снимаемое с обкладок пьезокерамического диска, выполняющего роль датчика амплитуды, переменное напряжение подается на вход микроконтроллера со встроенным аналого-цифровым преобразователем. По программе микроконтроллера происходит измерение амплитуды сигнала и фиксация момента времени, в который произошло падение амплитуды.

5.6 Моделирование и методики поверки специальных многощуповых средств измерений

Измерительные приборы (как рабочие, так и эталонные) можно поверять одним из трех методов:

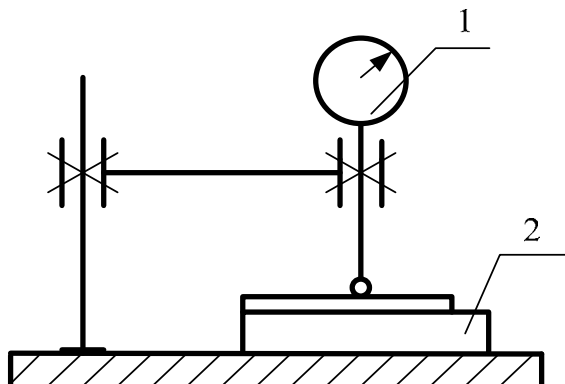
- по эталонным мерам,
- по эталонному прибору,
- по эталонному прибору и эталонным мерам.

По умолчанию подразумевается, что поверка осуществляется в нормальных условиях, высококвалифицированным оператором, а погрешности метода практически отсутствуют или незначимы.

Для поверки прибора по эталонным мерам необходимо иметь однозначные меры (набор мер), либо многозначную меру, позволяющие воспроизводить соответствующие значения физической величины. Схема поверки представлена на рис. 5.19 Модель одной из операций процесса поверки (поверка прибора в одной контрольной точке) можно описать следующим образом: на вход поверяемого прибора 1 с помощью образцовой меры 2, воспроизводящей заданное значение физической величины Q_m подаются нормированный сигнал измерительной информации, который

должен вызвать отклик, равный значению X_M на выходе прибора. Погрешность прибора Δ в поверяемой точке равна разности между реальным откликом прибора X_{Π} и нормированным откликом

$$\Delta = X_{\Pi} - X_M. \quad (5.12)$$



1 – поверяемый прибор, 2 – образцовая мера

Рисунок 5.19 – Поверка прибора по образцовым мерам

В такой модели поверочной операции используются две модели средств измерений (образцовой меры и поверяемого прибора), причем считается, что мера воспроизводит только одно приписанное ей значение физической величины Q_M (если мера многозначная, она тоже воспроизводит только одно заданное в конкретной поверочной операции значение физической величины Q_M). Погрешность меры принимается Δ_M практически равной нулю

$$\Delta_M = Q_M - Q = 0, \quad (5.13)$$

следовательно, воспроизводимое мерой значение идеально соответствует номиналу Q

$$Q_M = Q. \quad (5.14)$$

Справедливость такой модели в общем случае обусловлена выполнением двух требований к малости погрешности меры:

- погрешность меры должна быть пренебрежимо малой по сравнению с погрешностью поверяемого прибора;

- если мера воспроизводит не одну, а бесконечное множество номинально одинаковых физических величин ($\Omega \Rightarrow \{L_1, L_2, L_3, \dots\}$), отличие каждой из них от номинального значения не должно превышать той же пренебрежимо малой погрешности.

Установление малости погрешностей и выбор критериев пренебрежимо малости представляет собой отдельную задачу.

В качестве семиотической модели поверяемого измерительного прибора в данном процессе используется функция (а точнее две функции) преобразования измерительного прибора: номинальная (приписанная прибору идеальная функция) и экспериментальная функция преобразования, определяемая в процессе поверки. Номинальная функция воспроизводится по точкам как идеальный отклик на выходе прибора X_m , соответствующий величине Q_m , которую воспроизводит образцовая мера и измеряет поверяемый прибор. Для воспроизведения линейной идеальной функции достаточно двух точек, полученных аналитически (без проведения измерений).

При поверке прибора по дискретным значениям мер проводят измерения выбранных значений меры поверяемым прибором, и для каждого измеренного значения Q_m с известным идеальным откликом X_m фиксируют реальные отклики на выходе прибора $X_{пi}$. Поскольку экспериментальная модель строится по результатам измерений, то в процессе поверки может быть получено некоторое множество реализаций в каждой точке, то есть

$$Q_m \Rightarrow X_{п1}, X_{п2}, X_{п3}, \dots, X_{пN}, \quad (5.15)$$

где N – число повторных измерений меры, которое может быть реализовано либо полным воспроизведением цикла измерения с переустановкой меры Q_m , либо частичным воспроизведением цикла измерения (например, арретированием прибора без изъятия меры). Если фактически мера воспроизводит множество $\{Q\}$ номинально одинаковых величин Q_i , то при полном воспроизведении цикла измерения на прибор при каждом из циклов будут воздействовать раз-

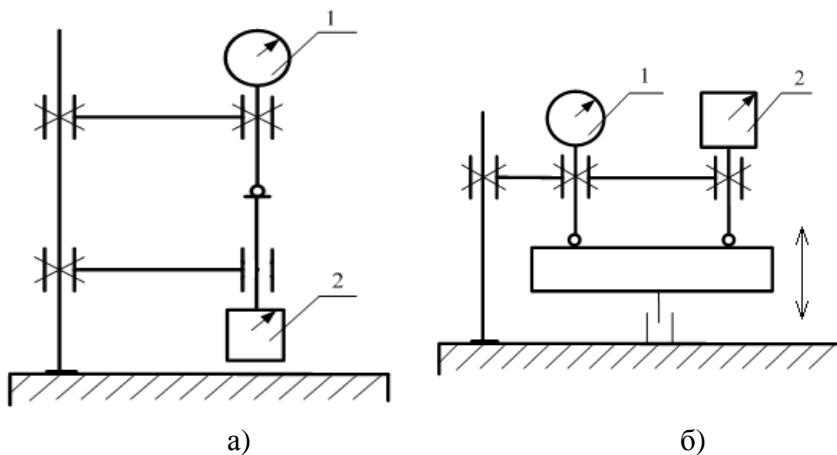
ные величины, причем $Q_i \in \{Q\}$, а $Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3 \neq \dots \neq Q_N$. При этом согласно второму допущению

$$Q_i - Q_j \leq \Delta, \quad (5.16)$$

где Δ – погрешность меры.

Поскольку поверка приборов по образцовой мере базируется на допущении о пренебрежимой малости погрешности этой меры, то во-первых различиями между всеми значениями Q_i если $Q_i \in \{Q\}$ можно пренебречь, а во-вторых становится очевидным отсутствие необходимости полного воспроизведения цикла измерения меры для получения повторных результатов в одной поверяемой точке (достаточно арретирования прибора).

При поверке прибора по эталонному прибору для воспроизведения заданной физической величины используют эталонный прибор (рис. 5.20 а, б) (если такая возможность предусмотрена), или измеряют поверяемым и эталонным приборами один и тот же объект измерений (не являющийся эталонной мерой) с последующей оценкой разности результатов измерений.



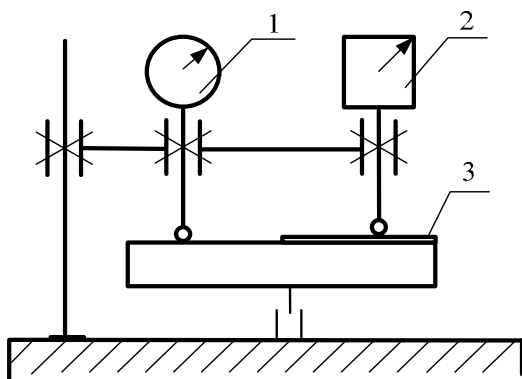
1 – поверяемый прибор, 2 – эталонный прибор, 3 – объект измерений (мера)

Рисунок 5.20 – Поверка по эталонному прибору (а), эталонному прибору и мере (б)

Поверка прибора по эталонному прибору и эталонным мерам (рис. 5.21) осуществляется с помощью последовательных измерений одних и тех же величин эталонным прибором с эталонными мерами и поверяемым прибором без эталонных мер, что позволяет использовать узкодиапазонные эталонные приборы повышенной точности. Оценка разности результатов измерений рассматривается как погрешность поверяемого прибора.

Построение подробных моделей процессов поверки для двух последних методов, представляет собой техническую задачу, которая решается аналогично рассмотренной. Тем же способом можно построить модели процессов поверки измерительных преобразователей, многозначных и однозначных мер.

Поскольку при поверке прибора следует определять только инструментальную погрешность, а фактически определяют погрешность измерения, необходимым условием поверки, как уже отмечалось, является обеспечение пренебрежимой малости всех не отыскиваемых составляющих погрешности измерения по сравнению с инструментальной погрешностью поверяемого прибора.



1 – поверяемый прибор, 2 – эталонный прибор, 3 – эталонная мера

Рисунок 5.21 – Поверка прибора по эталонному прибору и эталонным мерам

В большинстве случаев поверяемым прибором фактически измеряют физическую величину, воспроизводимую аттестованной мерой, причем либо используют эталонную меру, либо в качестве меры выступает объект, измеряемая физическая величина которого аттестуется эталонным прибором в ходе поверки. Исключения не составляет поверка прибора по эталонному прибору, воспроизводящему заданный размер измеряемой физической величины.

Следовательно, можно утверждать, что при поверке всегда используют либо известную с высокой точностью физическую величину, овеществленную в мере, либо нормированный сигнал измерительной информации, являющийся имитационной моделью меры.

При поверке измерительного прибора нормированную физическую величину может воспроизводить:

- мера, подобная реальному объекту измерения, то есть объект, приближающийся к идеальному и номинально воспроизводящий физическую величину одного размера (однозначная мера) или нескольких размеров (многозначная мера);
- один из подлежащих измерениям реальных объектов, аттестуемый эталонным прибором в ходе поверки, с присущими таким объектам несовершенствами (как правило, воспроизводящий бесконечное множество номинально одинаковых физических величин вместо одной);
- имитационная модель меры (специальная мера, не являющаяся полным аналогом объекта измерений), воспроизводящая физическую величину в виде, пригодном для измерений при поверке (настройке, аттестации) прибора;
- симулятивная модель меры, воспроизводящая входной сигнал измерительной информации, который оказывает на чувствительный элемент прибора воздействие, аналогичное воздействию измеряемой физической величины.

Различия в применении меры и реального объекта заключаются в том, что при измерении меры исключаются методические

погрешности, связанные со значимыми отличиями реального объекта от его идеальной модели, принятой для разработки методики выполнения измерений. В соответствии с названными различиями измерения меры предпочтительны для поверки прибора, когда все погрешности измерений кроме инструментальных должны быть сведены к пренебрежимо малым значениям. Аттестованные реальные объекты, позволяющие оценить значения методической составляющей погрешности измерений, желательно использовать для аттестации методик выполнения измерений, которые разработаны для реальных объектов, обладающих такими же несовершенствами.

Имитационные модели – специальные меры, метрологические характеристики которых соответствуют заданным, а некоторые технические могут значительно отличаются от характеристик измеряемых объектов, например, образцы шероховатости поверхности для настройки (поверки, аттестации) профилометров и профилографов, шкалы для поверки микроскопов. Применение имитационных моделей для поверки, аттестации и настройки приборов осуществляется значительно чаще, чем эти отличия фиксируются специалистами. Так прибор для измерения наружных цилиндрических поверхностей дифференциальным методом настраивают по плоскопараллельным концевым мерам длины, нутромер при измерениях внутренних цилиндрических поверхностей часто настраивают по блоку плоскопараллельных концевых мер длины с боковиками. Для настройки приборов, измеряющих геометрические параметры, используют конические поверхности вместо цилиндрических или сферических, ступеньки вместо нормированных значений радиального и торцового биения, а также отклонений от плоскостности, от параллельности и т.д.

Правомерность применения имитационных моделей (специальных мер) не вызывает сомнений при очевидном подобии воспроизводимых физических величин. В частности, при измерениях геометрических величин главным является обеспечение

точности расстояний, а особенности, связанные с реализацией поверхностей контакта, по возможности игнорируют. В качестве главных условий здесь выступают удовлетворительные метрологические характеристики применяемых мер, оценка которых при наличии средств измерений соответствующей точности не представляет труда.

Симулятивную модель меры (устройство для воспроизведения входного сигнала измерительной информации, оказывающего на чувствительный элемент прибора такое же воздействие, как измеряемая физическая величина) приходится специально разрабатывать, затем доказывать идентичность ее воздействия на прибор воздействию измеряемой физической величины, воспроизводимой мерой. На следующем этапе надо либо обеспечить аттестацию метрологических характеристик этих моделей с требуемой точностью, либо подтвердить соответствие метрологических характеристик симулятивных моделей характеристикам мер, подобных реальному измеряемому объекту.

На практике для исследования метрологических характеристик СМСИ в ряде случаев целесообразно применять имитационные методы, использующие специальные меры, не являющиеся полными аналогами объекта измерений, воспроизводящие физическую величину в виде, пригодном для измерений при поверке (настройке, аттестации) прибора.

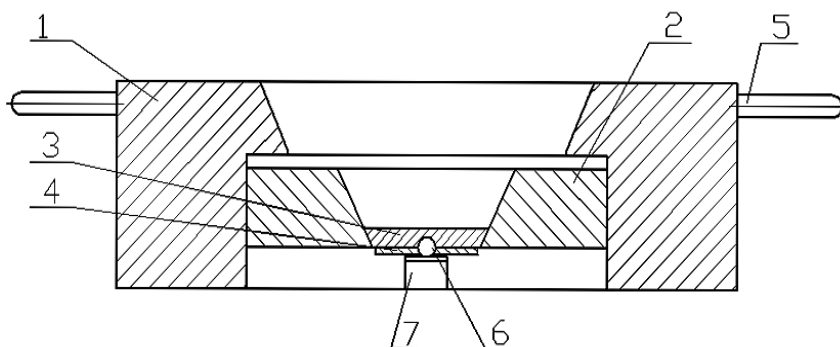
Различия в применении меры и реального объекта заключаются в том, что при измерении меры исключаются методические погрешности, связанные со значимыми отличиями реального объекта от его модели, принятой для разработки методики выполнения измерений. В соответствии с названными различиями измерения меры предпочтительны для поверки прибора, поскольку все погрешности измерений, кроме инструментальных, могут быть сведены к пренебрежимо малым значениям. Аттестованные реальные объекты, позволяющие оценить значения методической составляющей погрешности измерений, желательно использовать для аттестации методик выполнения измерений. При измерении реальных объектов, обладающих такими

же несовершенствами, будут проявляться такие же методические погрешности.

Имитационные меры представляют собой специальные меры, технические характеристики которых отличаются от характеристик измеряемых объектов, а метрологические характеристики соответствуют заданным, например, образцы шероховатости поверхности для настройки (поверки, аттестации) профилометров и профилографов, шкалы и объект-микрометры для поверки микроскопов [73].

Для проведения метрологической аттестации СМСИ параметров номинально сферических и конических поверхностей разработана имитационная мера, схема которой представлена на рис. 5.22.

Мера представляет собой сборочную единицу, состоящую из четырех основных деталей: корпус (поз. 1), кольцо (поз. 2), диск (поз. 3) и втулка (поз. 4). Основными функциональными поверхностями корпуса и кольца соответственно являются эталонная и установочная номинально конические поверхности. Данные поверхности служат для базирования СМСИ в мере. Следовательно, точность аттестации СМСИ будет, в первую очередь, определяться этими элементами и их перемещением друг относительно друга.



1 – корпус; 2 – кольцо; 3 – диск; 4 – втулка;
5 – ручка; 6 – опорный шарик; 7 – блок концевых мер длины

Рисунок 5.22 – Схема имитационной меры для аттестации СМСИ параметров номинально сферических и конических поверхностей

Взаимное расположение конических поверхностей в осевом направлении может изменяться путем расчетного перемещения установочного конуса, которое реализовывается с помощью установки блока плоскопараллельных концевых мер (поз. 7), при этом блок концевых мер длины устанавливается в специальное углубление в нижней части втулки (поз. 4) и верхней рабочей поверхностью прижимается к опорному шарикю (поз. 6).

Такое конструктивное решение имитационной меры дает возможность путем взаимного перемещения двух конических поверхностей обеспечивать изменение диаметра «плавающего сечения», в котором находятся измерительные наконечники СМСИ. За счет этого имитируется ряд сфер либо конусов с различными геометрическими параметрами.

5.7 Структурные схемы специальных многощуповых средств измерений (СМСИ), предназначенные для решения типовых метрологических задач

Высокопроизводительные СМСИ реализуются на основе сформулированных выше принципов проектирования, которые позволяют с использованием одной и той же модульной базы разрабатывать множество средств измерений различного функционального назначения.

Высокий уровень автоматизации и интеллектуализации измерительных процедур достигается за счет применения встроенных микропроцессоров или использования для управления процессом измерения и обработки информации автономных персональных компьютеров. В средствах измерений используются специальные измерительные преобразователи, для которых разработаны необходимый интерфейс и программное обеспечение. Специальные измерительные преобразователи, обеспечивают широкие функциональные возможности вновь создаваемых средств измерений, что позволяет успешно решать задачи инструментальной доступности поверхностей и добиваться требуемой точности контроля.

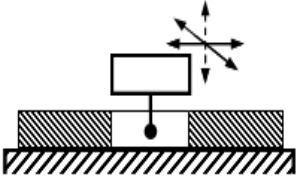
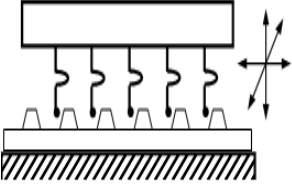
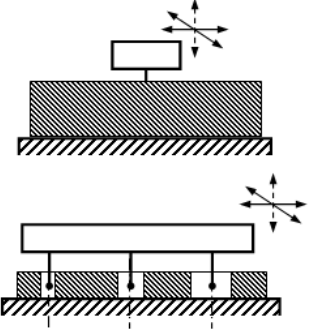
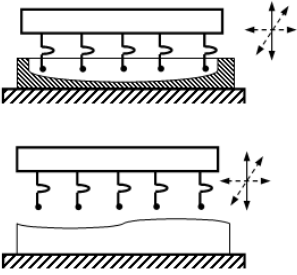
В средствах измерений предусмотрены специальные алгоритмы аналитической компенсации методических и инструментальных составляющих погрешностей измерений, что дает возможность снизить требования к точности изготовления используемых блоков-модулей. В результате необходимые точностные возможности средств измерений могут быть достигнуты при минимальной стоимости.

Варианты компоновочных решений специальных СМСИ, предназначенных для решения типовых метрологических задач приведены в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Варианты компоновочных решений специальных СМСИ, предназначенных для решения типовых метрологических задач

№	Задача измерительного контроля	Схема контроля	Примечание
1	2	3	4
1	Контроль размеров, отклонений формы и расположения номинально плоских поверхностей		Возможны также другие варианты задач измерительного контроля (контроль отклонений от симметричности и т.д.)

Окончание таблицы 5.2

1	2	3	4
2	Контроль размеров и отклонений формы отверстий, включая малые		Возможен контроль конических отверстий, пазов и т.д.
3	Контроль размеров, формы и расположения регулярно расположенных элементов		Можно контролировать рейки, гребенки, ходовые винты, гайки и т.д.
4	Контроль размеров, формы и расположения групп отверстий (соосных, с параллельными осями)		Возможен контроль малых отверстий
5	Контроль размеров, формы и расположения сложных поверхностей		Возможен контроль с измерительными перемещениями по одной координате

На основе принятой концепции были спроектированы и апробированы следующие средства измерительного контроля [74-76]:

Мобильный переналаживаемый информационно-измерительный комплекс для контроля геометрических параметров деталей типа тел вращения предназначен для операционного контроля и наладки технологического оборудования.

Комплекс позволяет контролировать следующие геометрические параметры:

- наружные размеры (диаметральные, осевые и др.) – качества от 6 и грубее;
- высоты уступов, глубины глухих отверстий и др – качества от 6 и грубее;
- отклонения формы наружных цилиндрических поверхностей – степени точности от 7 и грубее;
- торцовые и радиальные биения – степени точности от 7 и грубее.

Устройство для сортировки сопряженных поверхностей деталей на группы для селективной сборки.

Специальное многомерное средство измерений предназначено для совместных измерений диаметров наружных и внутренних цилиндрических сопрягаемых поверхностей деталей, разделения их на размерные группы для последующей селективной сборки (минимальный групповой допуск – 4 мкм). Контроль на одной измерительной позиции осуществляется одновременно в двух контрольных поперечных сечениях, разнесенных по длине контролируемой поверхности. Устройство выдачи измерительной информации представляет действительные значения измеряемых величин и номера групп сортировки.

Устройство для измерительного контроля диаметров двух соосных внутренних цилиндрических поверхностей.

Измерение осуществляется дифференциальным методом с настройкой по образцовой детали. Устройство отображения информации включает цифровое табло и устройства индикации годности деталей («годно», «брак исправимый», «брак неисправимый»). Предельная погрешность не превышает 5 мкм. Устройство может работать в автоматическом режиме.

Информационно-измерительный комплекс для контроля геометрических параметров сферических и конических поверхностей деталей.

Комплекс реализован в виде совокупности специальных накладных средств измерений, основанных на блочно-модульном принципе, и предназначен для контроля радиусов, координат центров, отклонений от сферичности и биений поверхностей. Позволяет контролировать путем прямых измерений методом сравнения с мерой радиусы сфер, включая узкие сферические пояса. В комплекс включены дополнительные модули, позволяющие оперативно модернизировать базовый сферометр в устройство измерений параметров конических поверхностей. По результатам метрологической аттестации основная погрешность базового сферометра не превышает 5 мкм.

Специальное средство измерений геометрических параметров ходовых винтов (гаек).

Средство измерений предназначено для контроля отклонений и накопленной погрешности шага ходовых винтов и гаек, являющихся элементами винтовых передач с трением качения или скольжения. При измерении осуществляется непрерывное сканирование контролируемой резьбовой поверхности на заданном диаметре с помощью специальной двухконтактной измерительной головки, содержащей один жесткий и один плавающий чувствительные элементы. Контроль осуществляется дифференциальным методом с настройкой на образцовую деталь и последующим ее замещением контролируемым объектом. Основная погрешность прибора не превышает 2,5 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломахо, В.Л. Метрологическое обеспечение координатных измерений в машиностроении / В.Л. Соломахо. – Минск: Реклама-Факсбелар, 1999. – 131 с.
2. Контроль качества продукции машиностроения / А.Э. Артеc[и др.]. – Минск: Издательство стандартов, 1974. – 447 с.
3. Аристов, О.В. Качество продукции / О.В. Аристов, В.М. Мишин. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 248 с.
4. Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции / А. Фейгенбаум. – М.: Экономика. – 1986. – 214с.
5. Иванов, А.Г. Измерительные приборы в машиностроении. М.: Изд-во стандартов, 1981. – 496с.
6. Леонов, В.В. Анализ методов измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности поверхностей / В.В. Леонов. –М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248с.
7. Марков, Н.Н. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях / Н.Н. Марков, Г.Б. Кайнер, П.А. Сацердотов. – М.: Машиностроение, 1967. – 392 с.
8. Координатные измерительные машины и их применение / В.-А. А. Гапшис [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
9. Берка, К. Измерения. Понятия, теории, проблемы /К. Берка; пер. К.Н. Иванов; послесл. Б.В. Бирюков, В.И. Михеев; ред. Б.В. Бирюков. – М.: Прогресс, 1987. – 320с.
10. Соломахо, В.Л. Качество метрологического обеспечения изготовления продукции / В.Л. Соломахо // Стандарты и качество. – 1996. – №8. – С.54–55.
11. Тарбеев, Ю.В. О структурах измерительных процедур/ Ю.В. Тарбеев, Т.Н. Сирая // Измерительная техника. – 1990. – № 11. – С.15–17.
12. Соломахо, В.Л. Контроль формы и расположения поверхностей с использованием аналитического моделирования / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский // Состояние и проблемы технических измерений: сб. докл. 1 Научн.-техн.конф., Москва, 16–18 ноября 1994 г./Моск. гос. техн. унив-т им. Баумана. – М.: 1994. – С.15–16.

13. Розенберг, В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем / В.Я. Розенберг. – М.: Советское радио. – 1975. – 289 с.

14. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник для вузов по специальности «Автоматизированные системы управления» / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.

15. Соломахо, В.Л. Прогрессивные методы и средства измерений линейных и угловых величин / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович. – Киев: Знание, 1990. – 20 с.

16. Соколовский, С.С. Метрологическое моделирование как основа проектирования и реализации методик выполнения измерений / С.С. Соколовский, Д.В. Соломахо, Б.В. Цитович // Приборы и методы измерений. – 2010. – №1. – С.147–152.

17. Соломахо, В.Л. Обеспечение требуемого уровня качества на основе оптимизации методик выполнения измерений / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский, В.Г. Лысенко // Обеспечение качества изделий: тез докл. 41-го Международного научного коллоквиума технического университета г.Ильменау (Германия), 1996 г. – С.68–71.

18. Соколовский, С.С. Системы классификации методов апланометрии // Технические ВУЗы – республике: Материалы Международной 52-й НТК БГПА, Минск, февраль, 1997 г./ БГПА. – Минск, 1997. – Ч.4, с.89.

19. Соколовский, С.С. Классификация методов апланометрии/ С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо// Метрология-97: тез. докл. Международной научно-практической конференции, Минск, 29 сент. – 2 окт. 1997 г. / ГП ЦЭСМ. – Минск, 1997. – С. 46–48.

20. Соколовский, С.С. Контроль формы и расположения поверхностей с учетом технологической наследственности / С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо// Метрология. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – Вып.9. – С.22–24.

21. Соломахо, В.Л. Использование оптимизированных систем координат для снижения погрешности измерений / В.Л. Соломахо // ВесціНацыянальнаяакадэміінавуцБеларусі. – 1999. –№ 4. – С.31–33.

22. Solomakho, V.L. New Approach to the Control of the Geometrical Detail Parameters as the Basis of the Quality Improvement of the Control Operations / V.L. Solomakho // 44 Internationaleswissenschaftskolloquium, Ilmenau. – 1999.

23. Статистическое управление процессами (SPC). Руководство: пер. с англ. – Н. Новгород: АО НИЦ КД: Приоритет, 1997. – 170с.

24. Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета: СТБ ГОСТ Р 50779.44-2003. – Введен 01.09.2003. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2003. – 24 с.

25. Соломахо, Д.В. Нормирование точности измерений при решении задач операционного контроля / Д.В. Соломахо, Б.В. Цитович, С.С. Соколовский // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2011. – № 2. – С.51–54.

26. Соломахо, Д.В. Использование метрологического моделирования процессов операционного контроля для нормирования погрешности измерений / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский, Б.В. Цитович // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 3. – С. 32–36.

27. Данилевич, С.Б. Планирование выходного измерительного контроля качества продукции / С.Б. Данилевич. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 137 с.

28. Сергеев, А.Г. Метрология: учебник / А.Г. Сергеев. – М.: Логос, 2005. – 272с.

29. Соломахо, Д.В. Проблемы нормирования погрешности измерений при операционном контроле в машиностроении / Д.В. Соломахо // Приборостроение-2009: материалы 2-й Международной науч.-техн. конференции, Минск, 11–13 ноября 2009 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 228–229.

30. Пугачев, В.С. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / В.С. Пугачев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496 с.

31. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969. – 400 с.

32. Соломахо, Д.В. Метрологическое моделирование процессов операционного контроля геометрических параметров деталей как инструмент обеспечения достоверности / Д.В. Соломахо // Приборы и методы измерений. –2011. – №1. – С.117–121.

33. Ящерицин, П.И. Работоспособность узлов трения машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. – М.: Наука и техника, 1984. – 288 с.

34. Ящерицин, П.И. Современные методы и средства контроля качества деталей / П.И. Ящерицин, Л.А. Олендер, Э.Л. Нехамкин. – М.: Беларусь, 1975 – 200 с.

35. Ящерицин, П.И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П.И. Ящерицын, Ю.В. Скорынин. –Минск: Наука и техника, 1978. – 119 с.

36. Ящерицин, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1977 – 255 с.

37. Ящерицин, П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей / П.И. Ящерицын. – Минск: Наука и техника, 1971 – 210 с.

38. Ящерицин, П.И. Исследование механизма образования шлифованных поверхностей / П.И. Ящерицын. –Минск: Институт научно-технической информации и пропаганды, 1962. – 41 с.

39. Соломахо, В.Л. Использование измерительной информации для контроля точности изделий и технологических процессов / В.Л.Соломахо, Б.В. Цитович // Приборостроение: сб. – Минск: Вышэйшая школа. – 1988.– Вып.10. – С.88–91.

40. Соломахо, В.Л. Контроль формы и расположения плоских поверхностей в условиях гибких производственных систем / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский // Приборостроение: сб. – Минск: Вышэйшая школа.–1988. – Вып. 10. – С.99–102.

41. Solomakho, V. Using of the Technological Principle of the Correspondence for Optimization of the Measuring Metrologi / V. Solomakho//44 Internationals wissenschaftliches Kolloquium, Pmenau, 1999. – S.41–43.

42. Соломахо, В.Л. Влияние технологической операции на достоверность метрологической информации / В.Л. Соломахо // *Technologiaobrobkiprzeznagniatanie: VI Konferencjanaukova-techniczna*, Wydgoszcz, 1966. – С. 232–235.

43. Соломахо, В.Л. Использование принципа технологическо-метрологического соответствия при контроле геометрических параметров деталей / В.Л. Соломахо // *Состояние и проблемы технических измерений: тез. конф. МГТУ им. Баумана, Москва, 26–28 ноября 1998 г.* / Моск. госуд. технич. унив-т. – М., 1998. – С. 241–243.

44. Соломахо, В.Л. К вопросу о контроле плоскостности / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский // *Измерительная техника.* – 1988. – №3. – С. 22–25.

45. Соколовский, С.С. Методы измерения отклонений формы номинально плоских поверхностей на основе аналитического моделирования реальных поверхностей: дис. канд. техн. наук: 05.11.15 / С.С. Соколовский. – Минск, 1998. – 250 л.

46. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 356 с.

47. Канатников, А.Н. Аналитическая геометрия / А.Н. Канатников, А.П. Крищенко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 240 с.

48. Соломахо, В.Л. О координатном контроле поверхностей, имеющих элементы прерывания / В.Л. Соломахо, О.А. Кротова // *Метрология и приборостроение.* – 2006. – № 3. – С.7–10.

49. Соломахо, В.Л. Особенности координатных измерений сложных поверхностей, представленных ограниченными участками окружности / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский, О.А. Кротова // *Вестник БНТУ.* – 2003. – № 1. – С. 43–47.

50. Соломахо, В.Л. Методика выполнения координатных измерений «неполных» поверхностей и поверхностей, имеющих элементы прерывания / В.Л. Соломахо, О.А. Кротова // *Приборы.* – 2006. – №10. – С. 32–36.

51. Кротова, О.А. Проектирование методик выполнения координатных измерений сложных поверхностей, имеющих элементы прерывания, с учетом минимизации количества кон-

трольных точек / О.А. Кротова, В.Л. Соломахо // Сб. докладов V научно-методической конференции студентов и преподавателей ВФУОИСЗ. – Витебск, 2003. – С. 249–251.

52. Кротова, О.А. Оценка влияния точности поверхности на границы работоспособности методик выполнения координатных измерений «неполных» поверхностей / О.А. Кротова // Наука – образованию, производству, экономике: материала 3-й Международной научно-технической конференции: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2006. – Т.2. – С. 478–481.

53. Кротова, О.А. Оценка суммарной неопределенности при координатных измерениях «неполных» поверхностей, имеющих элементы прерывания / О.А. Кротова // Метрология и метрологическое обеспечение: тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Минск: БелГИМ, 2007. – С. 120–124.

54. Кротова, О.А. Координатные измерения ограниченных участков поверхности с учетом коэффициентов воспроизводимости технологического процесса / О.А. Кротова // Вестник БНТУ. – 2005. – № 3. – С. 52–54.

55. Соломахо, Д.В. Метрологическое обеспечение операционного контроля геометрических параметров деталей машиностроения на базе комплексного подхода к метрологическому моделированию: дис. канд. техн. наук: 05.11.15 / Д.В. Соломахо. – Минск, 2011. – 218 л.

56. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения: ГОСТ 24643–81. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 14 с.

57. Глухов, В.И. Методология достоверных измерений размеров деталей / В.И. Глухов // Измерительная техника. – 1998. – № 5.

58. Палей, М.А. Способы оценки диаметров при координатных измерениях / М.А. Палей // Метрологическая служба в СССР. – 1987. – №2. – С.12–16.

59. Соломахо, В.Л. Обеспечение требуемого уровня качества на основе оптимизации методик выполнения измерений / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский, В.Г. Лысенко // Обеспечение качества изделий: тез докл. 41-го Международного научного

коллектива технического университета, г. Ильменау (Германия), 1996 г. – С.68–71.

60. Соломахо, В.Л. Оптимизация контроля геометрических параметров изделий на основе принципа перераспределения полей допусков / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович, С.С. Соколовский, О.А. Ленкевич // Вестник Белорусской политехнической академии. – 2002. – №1. – С.39–43.

61. Соломахо, В.Л. Методическое обеспечение оптимизации контроля геометрических параметров «плоских» деталей / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский, О.А. Ленкевич, И.А. Миклашевич // 55-я Международная НТК профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов БГПА «Потенциал науки – развитию промышленности, экономики, культуры, личности». – Минск, 2002.

62. Соломахо, Д.В. Классификация средств координатных измерений / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский // Вестник БНТУ. – 2010. – №1. – С. 35–39.

63. Радев, Христо. Метод измерения отклонений формы и расположения поверхностей и осей ротационных деталей относительно виртуальной базовой оси / Христо Радев // Метрология и метрологическое обеспечение: тезисы докладов Международ. научн.-техн. конференции; Минск, 26–27 апреля 2007 / редкол.: В.Н. Корешков [и др.]; под общ.ред. В.Н. Корешкова. – Минск: БелГИМ. – С.54–59.

64. Соломахо, Д.В. Конструктивные особенности средств измерений, используемых при операционном контроле деталей в машиностроении / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский // Метрология и приборостроение. – 2010. – №1. – С.29–33.

65. Соколовский, С.С. Роль специальных многощуповых координатных средств измерений в метрологическом обеспечении производства / С.С. Соколовский, Д.В. Соломахо, В.Н. Русецкий // Метрология-2009: доклады Международной научно-практической конференции, Минск, 14–15 апреля 2009 г. / БелГИМ; редкол.: В.Н. Корешков [и др.]. – Минск: БелГИМ, 2009. – С. 146–150.

66. Устройство для измерения параметров конических отверстий: пат. 2792 Республики Беларусь, МПК 7 G 01B 5/00 /

С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо, Д.В. Соломахо; заявитель: Белорусский национальный технический университет. – №и20050758, заявл. 30.11.2005; опубл. 30.06.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 3. – С. 174.

67. Соломахо, Д.В. Метрологическое обеспечение измерений радиуса и отклонения центра неполной номинально сферической поверхности / Д.В. Соломахо, В.А. Шапарь, С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 3. – С.23–26.

68. Соколовский, С.С. Измерительные преобразователи специальных многощуповых средств измерений геометрических параметров деталей / С.С. Соколовский, Д.В. Соломахо // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. трудов VII Международ. научно-техн. конф.: в 3 т. / под общ.ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – Т. 3. – С. 204–207.

69. Бородачев, Н.А. Обоснование методики расчета допусков размерных и кинематических цепей / Н.А. Бородачев. – М.: Л.: Издательство АН СССР, 1943. – Ч.1. – 88с.

70. Кемпинский, М.М. Точность и надежность измерительных приборов / М.М. Кемпинский. – Л.: Машиностроение, 1972. – 246с.

71. Соколовский, С.С. Специальные электроконтактные измерительные преобразователи / С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо, Д.В. Соломахо // Метрология и метрологическое обеспечение: тезисы докладов международной научно-технической конференции, г. Минск, Республика Беларусь, 26–27 апреля 2007 года / Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь (Госстандарт) [и др.]; ред.: В.Н. Корешков [и др.]. – Минск, 2007. – С. 318–321.

72. Измерительная головка: пат. 4685 Республики Беларусь, МКП G 01 B 5/00 / Д.В. Соломахо, В.Т. Минченя, Е.М. Кримцова; заявитель Белорусский национальный технический университет. – №и20080175; заявл. 03.03.2008; опубл. 30.06.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 174.

73. Соломахо, Д.В. Использование имитационных мер для исследования метрологических характеристик средств линейных измерений деталей машин / Д.В. Соломахо // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 4. – С.70–74.

74. Соломахо, В.Л. Комплексное метрологическое обеспечение производства / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович // Тез. докл. 51 науч.-техн. конф., Минск, 18–24 октября 1995 г./ БГПА. – Минск, 1995. – С.76–77.

75. Соломахо, В.Л. Пакет программ по метрологическому обеспечению линейных измерений / В.Л. Соломахо, Б.В. Цитович, И.Б. Борд // Метрологическое обеспечение машиностроительных отраслей промышленности: тез. Межд. науч.-тех. конф., Минск, 18–20 октября 1992 г./ Научн. тех. об-во Приборостроителей. – Минск, 1992. – С. 16.

76. Устройство для измерения отклонений центра внутренних сферических элементов деталей: пат. 3045 Республики Беларусь, МПК G 01 B 5/22 / С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо, Д.В. Соломахо; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № и20060188; заявл. 27.03.2006; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 174.

Научное издание

СОЛОМАХО Владимир Леонтьевич
ЦИТОВИЧ Борис Васильевич
СОКОЛОВСКИЙ Сергей Степанович
СОЛОМАХО Дмитрий Владимирович

ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ОПТИМИЗИРОВАННЫХ МЕТОДИК
КООРДИНАТНОГО КОНТРОЛЯ
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Подписано в печать 02.02.2012.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 13,89. Уч.-изд. л. 10,86. Тираж 100. Заказ 117.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.