

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 006.91:681.2+531.7.08

СОЛОМАХО
Дмитрий Владимирович

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА
БАЗЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К МЕТРОЛОГИЧЕСКОМУ
МОДЕЛИРОВАНИЮ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.15 – «Метрология
и метрологическое обеспечение»

Минск, 2011

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель:

Соколовский Сергей Степанович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Стандартизация, метрология
и информационные системы»
Белорусского национального
технического университета

Официальные оппоненты:

Головин Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Метрология и
техническая физика» Межотраслевого
института повышения квалификации и
переподготовки кадров по новым
направлениям развития науки и техники
БНТУ;

Кусакин Николай Алексеевич,
кандидат технических наук, профессор
кафедры «Менеджмент, экономика и
информационные системы» ГУО
«Кадры индустрии»

Оппонирующая организация:

Научно-производственное РУП
«КБТЭМ ОМО»

Защита состоится «29» ноября 2011 г. в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.13 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: Республика Беларусь, 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, тел. 292 22 01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «28» октября 2011 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.13

П.С. Серенков

©Соломахо Д.В., 2011

©БНТУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Точность деталей машин и приборов непосредственно влияет на их эксплуатационные характеристики, что в значительной мере определяет уровень качества выпускаемых изделий. Качество продукции формируется, обеспечивается, измеряется и поддерживается на всех стадиях жизненного цикла изделия. Повышение качества продукции машиностроения и приборостроения невозможно без решения вопросов, связанных с улучшением качества контроля, определяющим свойством которого является достоверность.

Не менее 70 % от общего объема измерений, выполняемых в условиях машиностроительного производства, связаны с контролем геометрических параметров. В связи с этим проблема совершенствования метрологического обеспечения линейных измерений является весьма актуальной.

Развитию теории метрологического обеспечения линейных измерений посвятили свои работы В.И. Глухов, Б.Б. Дунаев, Р. Carbone, Г.Б. Кайнер, А.Ю. Каспарайтис, А.Н. Карташева, А.К. Кутай, Н. Castrup, В.В. Леонов, D. Macii, W. Lotze, Н.Н. Марков, М.А. Палей, D. Petri, X. Радев, Н.А. Рубичев, Н.А. Серков, Ю.В. Тарбеев, И.Г. Фридляндер, И.Д. Фридман, В.Д. Фрумкин, Б.В. Цитович и др. Подавляющее большинство работ перечисленных авторов относится к рассмотрению вопросов оптимизации методов и средств измерений, применительно к проблемам приемочного контроля качества продукции. Однако до настоящего времени не сформулированы научно обоснованные принципы организации операционного контроля, подходы к нормированию допустимой погрешности и выбору средств измерений, принципы проектирования специальных средств измерений и средств их метрологической аттестации и калибровки. Так как операционный контроль осуществляется на всех стадиях производства и является преобладающим видом технического контроля в машиностроении, решение этих задач имеет важное значение. В современных условиях особая актуальность операционного контроля связана с широким внедрением систем менеджмента качества, главной задачей которых является профилактика брака непосредственно в процессе производства.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Тема диссертации соответствует п.2 «Механика машин, обеспечение надежности и безопасности технических систем, повышение конкурентоспособности продукции машиностроения» и п. 6.3 «Математические

модели и их применение к анализу систем и процессов в природе и обществе» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденного Постановлением Совета Министров от 17.05.2005 №512.

Исследования по тематике работы проводились в рамках следующих научных программ и тем:

– ГППНИ «Приборостроение». Задание «Приборостроение 1.01». Тема «Разработка методов и средств контроля геометрических параметров номинально криволинейных поверхностей с элементами прерывания» (ГБ 04-02). Сроки выполнения 02.01.2004 – 31.12.2005; номер государственной регистрации 2004949.

– тема «Разработка теоретических основ нормирования точности и инструментальное обеспечение контроля геометрических параметров изделий» (ГБ 06-98). Сроки выполнения 03.01.2006 – 31.12.2008; номер государственной регистрации 20061751.

– грант Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) «Теоретические основы проектирования методик координатных измерений поверхностей деталей машиностроения на базе метрологического моделирования объектов контроля» (Т08М-156). Сроки выполнения 01.04.2008 – 31.03.2010; номер государственной регистрации 20081371.

– грант Министерства образования Республики Беларусь «Оптимизация точности измерений при операционном контроле по критерию допустимого риска» (ГБ 11-151). Сроки выполнения 18.03.2011 – 31.12.2011; номер государственной регистрации 20111862.

По темам 1 и 2 соискатель принимал участие в исследованиях в качестве исполнителя, по грантам 3 и 4 – в качестве руководителя работ.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является развитие теории и разработка основ практической реализации метрологического обеспечения операционного контроля геометрических параметров деталей на базе комплексного подхода к метрологическому моделированию.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие задачи:

– разработка теоретических основ комплексного метрологического моделирования, включающего совместное построение моделей процессов, объектов и средств операционного контроля геометрических параметров деталей машиностроения;

– разработка математического и программного обеспечения построения метрологических моделей процессов и объектов операционного контроля и экспериментальная верификация разработанных моделей;

– разработка принципов проектирования специальных средств измерений для решения задач операционного контроля геометрических параметров деталей, не относящихся к типовым;

– разработка методик исследования метрологических характеристик специальных средств измерений и их метрологической аттестации.

Объектом исследования является методология и практика процесса измерительного операционного контроля геометрических параметров деталей машиностроения, предметом исследования – объекты, средства и процессы измерительного операционного контроля.

Положения, выносимые на защиту

– Методика метрологического моделирования процессов операционного контроля геометрических параметров деталей, основанная на учете допустимого риска принятия неправильного решения при контроле, позволяющая осуществлять адаптивное нормирование точности измерений.

– Методика метрологического моделирования объектов операционного контроля геометрических параметров деталей, основанная на приближении общего уравнения поверхности, заданного в неявном виде, по методу наименьших квадратов в конфлюэнтной реализации, позволяющая производить идентификацию типа контролируемой поверхности.

– Принципы проектирования, типовые структурные схемы и конструктивные решения специальных средств измерений, предназначенных для проведения операционного контроля, структура и метрологические характеристики которых определяются принятой для данной контрольной задачи метрологической моделью.

– Метод исследования метрологических характеристик специальных средств измерений с использованием имитационных мер, косвенно воспроизводящих геометрические параметры номинальных в математическом смысле поверхностей в диапазоне, пригодном для проведения процедур метрологической аттестации и калибровки.

– Алгоритмы и структурные схемы программных средств автоматизированного проектирования методов и средств операционного контроля геометрических параметров деталей, обеспечивающие решение многокритериальных оптимизационных задач, позволяющих проектировать эффективные по различным критериям методики контроля.

Личный вклад соискателя

Все основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Научный руководитель кандидат технических наук, доцент

С.С. Соколовский участвовал в выборе направления исследований и разработке конструктивных решений специальных средств измерений. Кандидат технических наук, доцент Б.В. Цитович принимал участие в анализе и интерпретации результатов исследований. Кандидат физико-математических наук, доцент В.Я. Анисимов участвовал в разработке математического аппарата метрологических моделей процессов операционного контроля.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты, полученные в ходе исследований по теме диссертационной работы, докладывались и обсуждались на 11 международных и 3 республиканских научно-технических конференциях, в том числе на VII Международной летней школе-семинаре аспирантов, магистрантов и студентов «Современные информационные технологии» (г. Браслав, 2004 г.), II МНТК «Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология изготовления» (г. Минск, 2004 г.), 51-м Международном научном коллоквиуме «Информационные технологии и электроника – устройства и системы, материалы и технологии будущего» (г. Ильменау, ФРГ, 2006 г.), Республиканской НТК аспирантов, магистрантов и студентов «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (г. Могилев, 2006 г.), МНТК «Метрология и метрологическое обеспечение» (г. Минск, 2007, 2009 гг.), VII МНТК «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (г. Новополоцк, 2009 г.), 14-м Международном конгрессе по метрологии (г. Париж, Франция, 2009 г.), МНТК «Приборостроение» (г. Минск, 2009, 2010, 2011 гг.).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам диссертации опубликовано 28 научных работ (5,1 авторских листа). Среди них 9 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (3,4 авторских листа), 3 статьи в научных журналах и сборниках научных трудов, 9 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 тезиса докладов, 3 патента Республики Беларусь и 1 заявка на выдачу патента. Без соавторов опубликовано 6 работ, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. В общий объем диссертации входят 220 страниц, в том числе 139 страниц основного текста с 54 иллюстрациями, 8 таблицами и 6 приложений на 81 странице. Библиографический список включает 104 наименования, в том числе 28 публикаций соискателя.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснована актуальность темы, выделены важные проблемы, имеющие теоретическое и практическое значение, сформулированы цели и задачи исследования, отражена связь работы с крупными научными программами и темами, а также определен круг вопросов, выносимых на защиту.

В первой главе проведен обзор основных принципов организации технического контроля в машиностроении. Выделены классификационные признаки видов технического контроля и приведена их классификация. Показано, что основная часть контрольных операций приходится на операционный контроль, который оказывает определяющее влияние на качество производимой продукции. На основании анализа различных подходов к измерительному контролю геометрических параметров деталей сделан вывод о том, что точность и достоверность контроля определяются адекватностью применяемых метрологических моделей.

Изложены результаты анализа существующих подходов к нормированию точности измерений в процессе контроля. Показано, что применяемые на сегодняшний день правила нормирования допустимой погрешности измерения при приемочном контроле, распространяемые также на операционный контроль, учитывают взаимосвязь погрешности измерения с допуском на контролируемый параметр:

$$[\Delta] = (1/5 \dots 1/3)T, \quad (1)$$

где $[\Delta]$ – допустимая погрешность измерения;

T – допуск контролируемого параметра.

Такой подход к нормированию погрешности измерений при операционном контроле не является оптимальным, поскольку достоверность результатов контроля, связанная с вероятностью признания бракованного изделия годным и наоборот, во многом зависит от параметров, характеризующих состояние технологического процесса. В качестве обобщенной характеристики состояния технологического процесса применяется индекс пригодности P_p . Учет состояния технологического процесса позволяет предложить адаптивное нормирование погрешности измерений при операционном контроле.

В первую главу также включено описание современных средств координатных измерений и приведена их классификация. На основании проведенного обзора сформулированы задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы метрологического моделирования процессов операционного контроля. Модели используются для

описания основных свойств и параметров операционного контроля и определения на этой основе допустимой погрешности измерений.

В целях обеспечения полноты охвата контролем технологических процессов производства изделия постулировано наличие двух различных групп контрольных задач. Первая группа задач связана с нахождением действительного значения контролируемого параметра с целью отнесения объекта по результатам контроля к годным либо бракованным. Вторая группа задач направлена на оценку состояния технологического процесса (мониторинг процесса) на основе определения действительных значений контролируемого параметра и последующей обработке результатов по определенному алгоритму. К задачам второй группы можно отнести исследование точности технологического процесса и контроль состояния технологического оборудования.

Классификация метрологических моделей процессов операционного контроля приведена на рисунке 1.

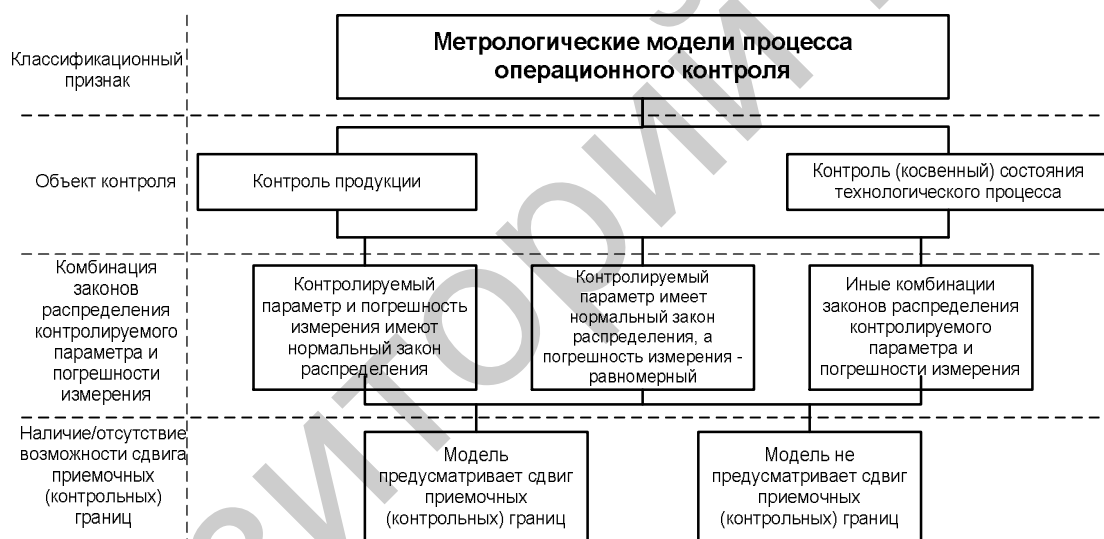


Рисунок 1 – Классификация метрологических моделей процессов операционного контроля

В качестве аналитического описания метрологической модели контроля продукции будем рассматривать двумерную случайную величину (x, y) , где компонента x – истинное значение измеряемой физической величины, y – результат измерения:

$$f(x, y) = f(x)f(y|x). \quad (2)$$

Рассмотрим модель, в которой значение измеряемой величины и результат измерения распределены по нормальному закону. Обозначим среднее

квадратическое отклонение (СКО) истинного значения измеряемой величины $\sigma_{\text{тех}}$, СКО погрешности измерения – $\sigma_{\text{изм}}$, нижнюю и верхнюю границы поля допуска USL и LSL , нижнюю и верхнюю приемочные границы CR_{\min} и CR_{\max} соответственно.

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

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{тех}}} e^{-\frac{(x)^2}{2\sigma_{\text{тех}}^2}}; \quad (3)$$

$$f(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{изм}}} e^{-\frac{(y-x)^2}{2\sigma_{\text{изм}}^2}}. \quad (4)$$

Вероятности правильного принятия $P(A)$, неправильного принятия $P(B)$, неправильного забракования $P(C)$ и правильного забракования $P(D)$ продукции можно найти путем двойного интегрирования выражения (2). Введем некоторые упрощения в целях избежания необходимости двойного интегрирования. Рассмотрим вероятность $P(A+B)$:

$$P(A + B) = \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} dy \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dx = \int_{CR_{\min}}^{CR_{\max}} f_y(y) dy, \quad (5)$$

где $f_y(y)$ – маргинальная плотность компоненты y :

$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{1+d^2}} e^{-\frac{y^2}{2(1+d^2)}}, \quad (6)$$

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

Интеграл (5) можно вычислить и, при условии, что $CR_{\max} = -CR_{\min} = c$, он равен

$$\int_{-c}^c f_y(y) dy = \text{erf} \left\{ \frac{c}{\sqrt{2(1+d^2)}} \right\}. \quad (7)$$

Отсюда можно определить вероятность $P(B)$:

$$P(B) = \text{erf} \left\{ \frac{c}{\sqrt{2(1+d^2)}} \right\} - P(A). \quad (8)$$

По аналогии с выражениями (5) – (8) вычисляем вероятность $P(C)$:

$$P(C) = \text{erf} \left\{ \frac{g}{\sqrt{2}} \right\} - P(A), \quad (9)$$

где $USL = -LSL = g$.

Тогда

$$(D) = 1 - P(A) - P(B) - P(C). \quad (10)$$

Индекс пригодности процесса $P_p = \frac{USL-LSL}{6\sigma_{\text{тех}}} = \frac{2g}{6\sigma_{\text{тех}}} = \frac{g}{3\sigma_{\text{тех}}}$ можно легко учесть в формулах (5) – (10). Расчетные значения вероятностей $P(A)$, $P(B)$, $P(C)$ и $P(D)$ смоделированы при значениях $P_p = 0,9 - 1,1$ и $d = 0,1 - 1,0$; $c = g$ и представлены на рисунке 2 (а, б, в, г соответственно).

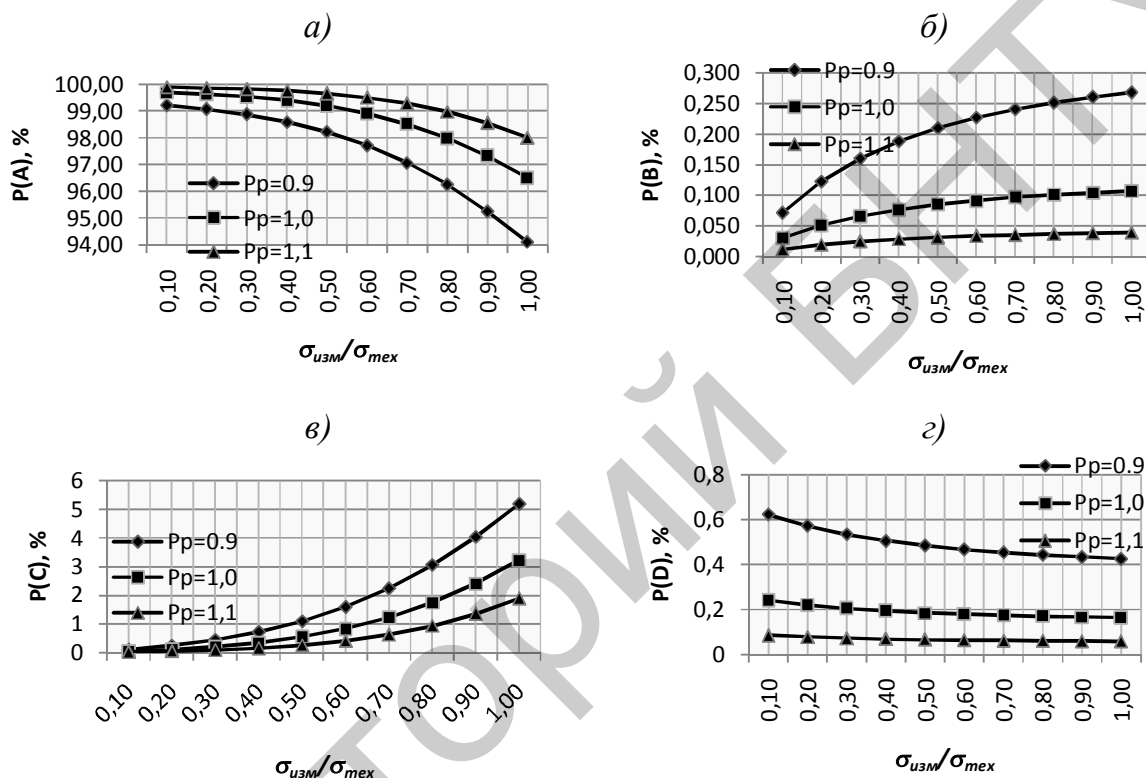


Рисунок 2 – Результаты моделирования при нормальном законе распределения контролируемого параметра и погрешности измерения

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что 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 $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}} = 1,0$. Изменение индекса пригодности процесса приводит к изменению вероятности неправильного принятия продукции в 2,5 – 3 раза.

Результаты моделирования подтверждают целесообразность применения адаптивного подхода к нормированию точности измерений при операционном контроле. 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, по ГОСТ 8.051 для соотношения $\sigma_{\text{изм}}/\sigma_{\text{тех}} = 0,2$ предельные значения вероятностей неправильного приема и забракования продукции равны соответственно 2,0 и 2,8 %, а проведенные с использованием предложенных метрологических моделей расчеты показывают, что при $P_p = 0,9$ они равны соответственно 0,12 и 0,43 %. Для более стабильных процессов эти значение еще меньше. Это позволяет сделать вывод о возможности оптимизации точности измерений по критерию их экономичности, поскольку для достаточно стабильных процессов без существенного ущерба для достоверности контроля можно применять менее точные СИ. 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 90 %.

При высоких требованиях к достоверности контроля необходимая точность может оказаться практически нереализуемой по техническим или экономическим соображениям. Одним из возможных вариантов решения этой задачи является введение приемочных границ, отличающихся от нормативных.

Рассмотрено влияние сужения приемочных границ на вероятности неправильного принятия и забракования продукции. С этой целью произведено моделирование вероятностей $P(B)$ и $P(C)$ 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. Установлено, что для обеспечения требуемого уровня пропуска брака имеется возможность реализовать методики выполнения измерений с меньшей точностью за счет увеличения доли неправильно забракованной продукции. В таблице приведены рекомендации по выбору параметров контроля, необходимых для выполнения требований заказчика к уровню дефектности партии продукции.

Рекомендуемые расчетные значения параметров контроля

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 – 10	0,90	0,80	0,20
	1,00	0,85	0,20
	1,33	1,00	0,10
		0,90	0,50
50 – 100	0,90	0,85	0,20
	1,0	0,80	0,40
		0,90	0,20
	1,33	1,00	1,00

Для обеспечения выполнения требований к достоверности контроля в случаях, когда нормальность распределения погрешности измерения не подтверждена, распределение погрешности следует принимать равномерным. Нами проведено метрологическое моделирование с целью расчета вероятностей $P(A)$, $P(B)$, $P(C)$ и $P(D)$ при равномерном распределении погрешности. При этом зафиксировано незначительное увеличение расчетных вероятностей принятия бракованной продукции (на 0,01 – 0,08 %) и значительное увеличение расчетной вероятности отбраковки годной продукции (на 0,1 – 14 %).

Разработаны рекомендации по нормированию погрешности измерения при контроле состояния технологического процесса и технологического оборудования.

В третьей главе приводится классификация метрологических моделей объектов операционного контроля геометрических параметров деталей.

Излагается новый метод построения метрологической модели объекта операционного контроля посредством приближения конфлюэнтным методом наименьших квадратов неявно заданных уравнений общего вида поверхностей второго и более высоких порядков, позволяющий получать адекватные приближения реальных поверхностей и производить их идентификацию.

В случае поверхности второго порядка применение метода наименьших квадратов приводит к необходимости минимизировать выражение

$$S(A_{i,j}, a_i) = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 A_{i,j} x_{i,k} x_{j,k} + \sum_{i=1}^3 a_i x_{i,k} + 1 \right)^2, \quad (11)$$

где N – количество контрольных точек измерения поверхности;

$A_{i,j}$, a_i – подлежащие определению постоянные коэффициенты;

$x(x_1, x_2, x_3)$ – переменная точка в R_3 .

Необходимое условие экстремума – равенство нулю всех частных производных по параметрам $A_{i,j}$ и a_i – приводит к системе из девяти уравнений, линейных относительно данных параметров. Решение данной системы позволяет найти коэффициенты уравнения, задающего аппроксимацию реальной поверхности детали по результатам измерений координат ее точек.

Общее уравнение поверхности имеет некоторое количество инвариант, определение которых позволяет произвести идентификацию типа поверхности. Для этого производится измерение координат точек контролируемой поверхности детали, после чего находятся инварианты поверхности, по значениям которых она относится к определенному типу. Набор возможных типов поверхности определяется порядком ее уравнения, который известен априорно исходя из чертежа детали, технологии ее изготовления и т. д.

При условии, что применяемые СИ позволяют измерять координаты большого числа контрольных точек ($N > 9$), определение коэффициентов уравнения поверхности производится одноэтапно по методу наименьших

квадратов, после чего найденные коэффициенты используются для идентификации. В противном случае следует путем последовательных приближений исключать коэффициенты, имеющие второй и более высокий порядок малости. В предельном случае для идентификации поверхности используются девять контрольных точек.

Проведение идентификации позволяет решить две задачи, оказывающие влияние на качество контроля. Во-первых, определение наиболее близкого типа номинальной поверхности по отношению к некоторой реальной реализации поверхности детали позволяет обеспечить адекватность получаемых моделей объектов контроля. Во-вторых, при идентификации поверхности имеется возможность сократить число контрольных точек, необходимых для ее построения. При этом общее уравнение поверхности заменяется на частное уравнение идентифицированной поверхности, содержащее меньшее число членов. Это обстоятельство создает предпосылки для проектирования высокоэффективных специальных СИ.

Для оценки адекватности метрологических моделей объектов контроля предложены следующие критерии:

$$\rho_1 = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{\sum_i^N (z_i - z_i^*)^2}{N}}, \quad \mu_1 = \frac{1}{T} \max\{|z_i - z_i^*|\}, \quad (12)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{T} \sqrt{\frac{\int \int [z(x, y) - z^*(x, y)]^2 dx dy}{\int \int z(x, y) dx dy}}, \quad \mu_2 = \frac{1}{T} \max\{|z(x, y) - z^*(x, y)|\}, \quad (13)$$

где N – число контрольных точек, используемых для построения модели;

z_i – координата i -й точки модели;

z_i^* – координата i -й точки по результатам измерения исходной поверхности;

$z(x, y)$ – моделируемая теоретическая поверхность;

$z^*(x, y)$ – аппроксимирующая модель поверхности.

Критерии μ_1 и ρ_1 применяются в случае, если исходная поверхность задана в виде массива координат контрольных точек, что характерно при работе с результатами измерений. Критерии μ_2 и ρ_2 применяются при работе с исходной поверхностью, заданной аналитически, что характерно для имитационного моделирования при проведении верификации моделей.

Предлагаемые оценки адекватности метрологических моделей позволяют выбирать лучшую методику моделирования из конкурирующих либо производить экспериментальную верификацию моделей на основе имитационного моделирования. При сравнении моделей более адекватной считается та, у которой меньше значения критериев (12), (13). Кроме того, данные критерии могут быть непосредственно использованы в качестве оценок

методической составляющей погрешности, обусловленной неидеальностью применяемой модели объекта контроля.

Возможность применения разработанного метода метрологического моделирования для адекватного описания объектов контроля подтверждена экспериментально.

В четвертой главе описаны предлагаемые принципы проектирования, типовые структурные схемы и конструктивные решения специальных многощуповых средств измерений (СМСИ).

Установлено, что определяющее влияние на конфигурацию СМСИ оказывает количество и направление измерительных перемещений, а также конструктивное исполнение многощуповой измерительной головки (МИГ), 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. Независимые щупы осуществляют измерение перемещения измерительного наконечника либо фиксируют момент его контакта с контролируемой поверхностью, исходя из чего их разделяют на две группы: щупы непрерывного и дискретного действия.

На рисунке 3, *а* представлена структурная схема СМСИ с независимыми щупами непрерывного действия. Измерительные сигналы X_1, X_2, \dots, X_N , содержащие информацию о перемещении измерительных наконечников, поступают через модуль преобразования сигнала на модуль управления, где реализуется расчет координат точек касания измерительных наконечников с контролируемой поверхностью. Выходной сигнал $Q(X_1, X_2, \dots, X_N)$ выдается на устройство индикации либо в персональный компьютер. Так как 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.

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 (рисунок 3, *б*). При перемещении МИГ каждый из дискретных щупов срабатывает в момент касания с контролируемой поверхностью. Одновременно определяется положение МИГ $X_{\text{МИГ}}$, а следовательно, и координаты точки касания.

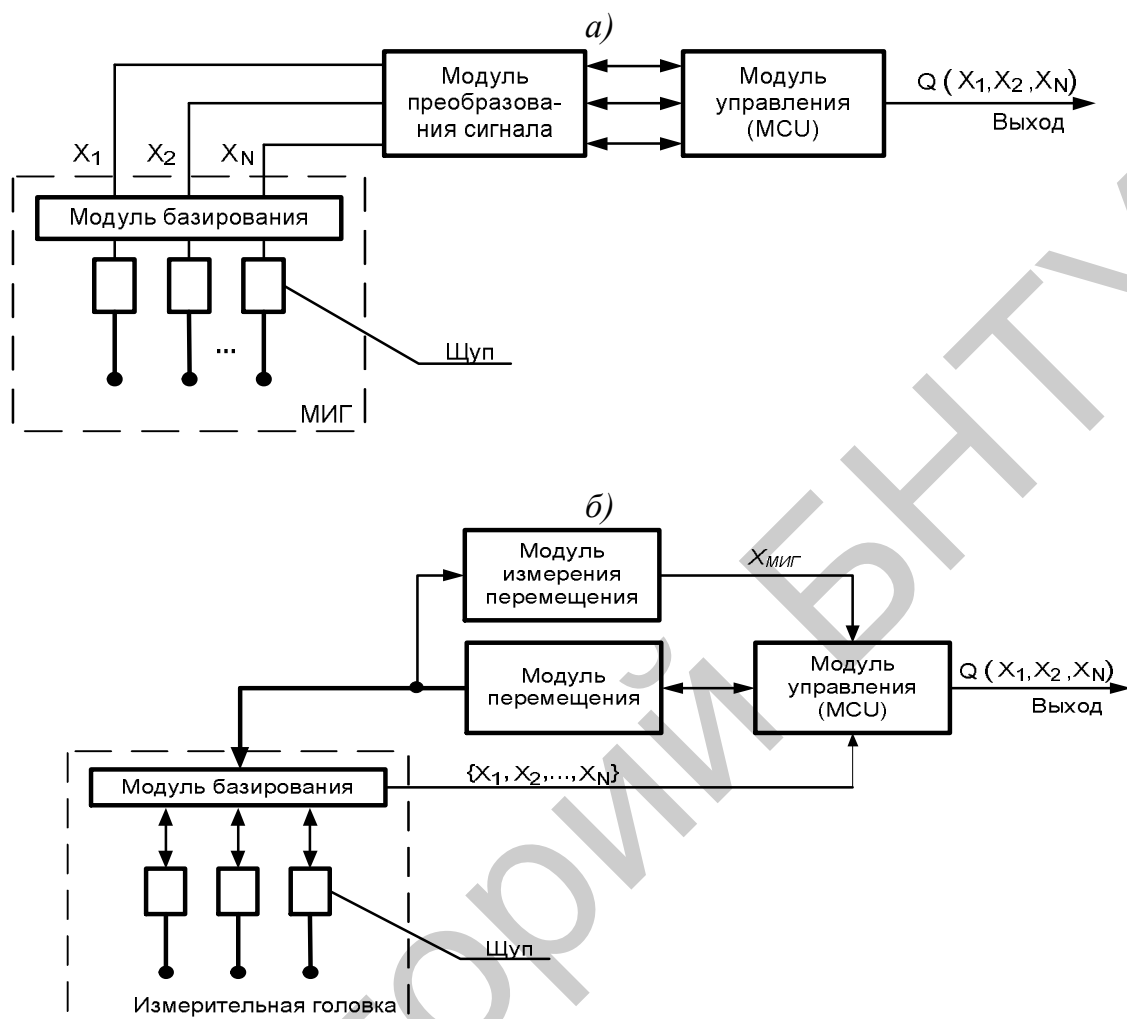


Рисунок 3 – Структурные схемы СМСИ с независимыми щупами непрерывного (а) и дискретного (б) действия

Разработаны конструкции ряда СМСИ для проведения операционного контроля параметров номинально сферических и конических поверхностей.

Для исследования метрологических характеристик СМСИ, проведения их метрологической аттестации и калибровки предложена специальная имитационная мера, позволяющая имитировать ряд сфер и конусов с любыми размерами, находящимися в пределах диапазона измерения СМСИ. Применение данной меры позволяет существенно упростить процедуры метрологической аттестации и калибровки СМСИ.

Описаны алгоритмы и структурные схемы разработанных программных средств автоматизированного проектирования методик операционного контроля геометрических параметров деталей машиностроения. Данные программные средства реализуются в виде распределенных сетевых сервисов.

На рисунке 4 приведена блок-схема алгоритма процесса проектирования методики выполнения операционного контроля (МВОК). Разработаны базы данных, использование которых позволяет автоматизировать все операции процесса проектирования МВОК.

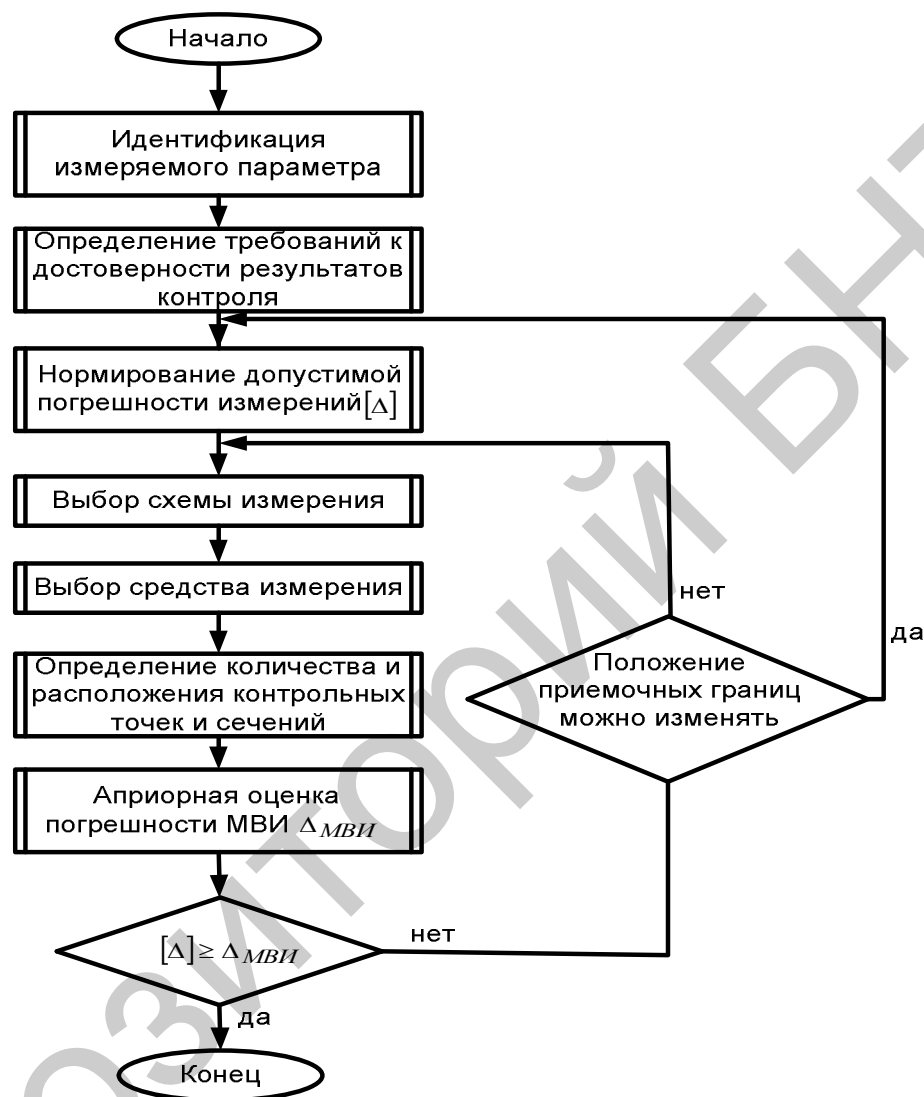


Рисунок 4 – Алгоритм процесса проектирования методики выполнения операционного контроля

Важнейшей функцией программного обеспечения автоматизированного проектирования МВК является автоматическая оптимизация проектируемых методик по различным критериям: точности, экономичности, классу применяемых СИ и т. д.

Разработанные программные средства представляют собой законченный продукт, готовый к внедрению на промышленных предприятиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В ходе выполнения диссертационных исследований решена актуальная задача теоретической метрологии, заключающаяся в разработке основ комплексного метрологического моделирования процессов, объектов и средств контроля применительно к контролю геометрических параметров деталей машиностроения. На основании комплексного метрологического моделирования разработаны элементы метрологического обеспечения операционного контроля в машиностроении [5 – 7, 12, 24].

2. В рамках комплексного подхода к метрологическому моделированию предложена методика метрологического моделирования процессов операционного контроля, основанная на учете допустимого риска принятия неправильного решения при контроле, позволяющая осуществлять адаптивное нормирование допустимой погрешности измерений, исходя из требований к достоверности, что позволяет увеличить допустимые погрешности измерений при стабильности технологического процесса $Pp \geq 0,75$ в 1,1 – 2 раза по сравнению со значениями, рекомендуемыми ГОСТ 8.051, без снижения достоверности результатов [5, 6, 8, 20, 21].

3. Разработана методика метрологического моделирования объектов операционного контроля геометрических параметров деталей, основанная на приближении общего уравнения поверхности, заданного в неявном виде, по методу наименьших квадратов в конфлюэнтной реализации, позволяющая производить идентификацию типа контролируемой поверхности по минимальному (девяти) и избыточному (шестнадцати) количеству контрольных точек, что создает предпосылки для использования специальных средств измерений, стоимость которых существенно (от 25 до 70 %) ниже стоимости высокоточных универсальных средств измерений. Предложены критерии адекватности метрологических моделей объектов операционного контроля, позволяющие производить верификацию моделей, построенных по минимальному количеству контрольных точек [1, 10, 12 – 15, 24].

4. Сформулированы принципы проектирования специальных многوشуповых средств измерений для решения задач операционного контроля геометрических параметров деталей, включающие модульную компоновку, базирование на объекте измерения, цифровую обработку сигналов и аналитическую компенсацию погрешности, позволяющие проектировать специальные многوشуповые средства измерений для контроля условно неконтролепригодных параметров деталей машиностроения [2, 3, 9, 11, 18, 19, 22, 23, 25 – 28].

5. Предложен новый имитационный метод исследования метрологических характеристик специальных многощуповых средств измерений геометрических параметров деталей, основанный на использовании специальных имитационных мер, не являющихся полными аналогами объектов измерения, но воспроизводящих физическую величину в виде, пригодном для измерений при исследовании метрологических характеристик, аттестации и калибровке прибора. При этом имитируется (косвенно воспроизводится) ряд поверхностей с любыми размерами, находящимися в пределах диапазона измерения исследуемого средства измерения, что позволяет снизить себестоимость метрологической аттестации и калибровки не менее чем на 30 % [4, 17].

6. Разработаны элементы автоматизированной системы проектирования методик выполнения операционного контроля геометрических параметров деталей, включающие специальные алгоритмы, базы данных, программные средства, позволяющие осуществлять оптимизацию методик операционного контроля по критериям снижения себестоимости и повышение достоверности результатов с учетом комплексного подхода к метрологическому моделированию процессов, объектов и средств операционного контроля [16, 22].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты нашли практическое применение на ряде промышленных предприятиях Республики Беларусь. Так на ООО «Рухсервомотор» внедрена методика нормирования допустимой погрешности измерений при операционном контроле геометрических параметров деталей сервоприводов по критерию допустимого риска, что позволит повысить достоверность результатов контроля и снизить ее себестоимость. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составит 36,4 млн. руб. в год. Совместно с РУП «Научное приборостроение» НАН Беларуси разработана конструкторская документация на специальные многощуповые средства измерения параметров внутренних цилиндрических поверхностей и сложных криволинейных поверхностей деталей. Для ОАО «Минский автомобильный завод» разработана конструкторская документация на специальное средство измерений параметров внутренних сферических поверхностей (СФ-01) деталей типа «чашка» дифференциала заднего моста автомобилей МАЗ (шифр 724585).

Методика нормирования погрешности измерений при статистическом контроле качества включена в типовую учебную программу по дисциплине «Статистические методы контроля качества» для студентов специальности 1-54 01 01-01 «Метрология, стандартизация и сертификация» высших учебных заведений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК

1. Соломахо, Д.В. Имитационное моделирование реальных поверхностей деталей / Д.В. Соломахо, В.А. Нифагин // Метрология и приборостроение. – 2009. – № 1. – С.13 – 16.
2. Соломахо, Д.В. Классификация средств координатных измерений / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2010. – № 1. – С.35 – 39.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

Статьи в научных журналах и сборниках научных трудов

10. Соломахо, Д.В. Использование кубических параметрических сплайнов в решении задач теории координатных измерений /Д.В. Соломахо, В.А. Нифагин // Вести Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2. – С.118 – 121.

11. Соколовский, С.С. Повышение качества измерений геометрических параметров номинально сферических элементов деталей /С.С. Соколовский, Д.В. Соломахо, К.И. Дадьков // Теория и практика машиностроения. – 2005. – № 2. – С.2 – 4.

12. Solomakho, D. The role of metrological modeling in the selection of the measurement strategy / D. Solomakho // Лучший молодой метролог КООМЕТ – 2009: сборник докладов III Международного конкурса, Минск, 14 - 15 апреля 2009 г. / БелГИМ; редкол. Н.А. Жагора [и др.]. – Минск, 2009. – С.41 – 44.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

13. Нифагин, В.А. Методика аналитического моделирования реальных профилей при их координатном контроле / В. А. Нифагин, Д. В. Соломахо // Современные методы проектирования машин: респ. межведомств. сб. науч. тр. / М-во образования Респ. Беларусь, Бел. нац. техн. ун-т [и др.]; под общ. ред. П. А. Витязя. – Вып. 2 : в 7 т. – Т. 2: Качество изделий машиностроения. Проектирование материалов и конструкций. – 2006. – С. 38 – 41.

14. Соломахо, Д.В. Построение адекватных математических моделей при координатном контроле /Д.В. Соломахо // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: материалы VIII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов, Гомель, 22 – 24 марта 2005 г. / Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины; редкол.: С.Ф. Каморников [и др.]. – Гомель, 2005. – С. 65 – 66.

15. Соломахо, Д.В. Диагностика поверхности при координатном контроле / Д.В. Соломахо // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Могилев, 26.01.2006 г. / Белорусско-Российский университет; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – С. 260.

16. Педько, А.В. Система автоматизированного проектирования методик выполнения координатных измерений /А.В. Педько, Д.В. Соломахо // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: сборник материалов VI Междунар. межвузовской науч. техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 4 – 5 мая 2006 г. / Гомельский гос. техн. университет им. Сухого; редкол.: С.Б. Сарело [и др.]. – Гомель, 2006.

– С.37 – 40.

17. Соломахо, В.Л. Метрологическая аттестация специальных средств измерений с использованием имитационных мер / В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский, Б.В. Цитович, Д.В. Соломахо, Э.С. Блюменталь // Современные методы и приборы контроля качества и диагностика состояния объектов: материалы 2-й Междунар. науч. техн. конф., Могилев, 26 – 27 октября 2006.; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2006. – С. 225 – 228.

18. 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 Междунар. науч. практ. конф., Минск, 14-15 апреля 2009г. / БелГИМ; редкол.: В.Н. Корешков [и др.]. – Минск: БелГИМ, 2009. – С.146 – 150.

19. 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. научн. трудов VII Междунар. науч. техн. конф.: в 3 т. – Т. III / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С.204 – 207.

20. Соломахо, Д.В. Проблемы нормирования погрешности измерений при операционном контроле в машиностроении /Д.В. Соломахо // Приборостроение – 2009: материалы 2-й Междунар. науч. техн. конференции, Минск, 11-13 ноября 2009 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 228 – 229.

21. Соломахо, Д.В. Метрологическое моделирование процесса операционного контроля в машиностроении / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский, В.Я. Анисимов // Приборостроение – 2010: материалы 3-й Международной науч. техн. конф., Минск, 10-12 ноября 2010 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2010. – С.191 – 193.

Тезисы докладов на конференциях

22. Соломахо, Д.В. Метрологическое обеспечение операционного контроля геометрических параметров деталей / Д.В. Соломахо, В.Л. Соломахо, С.С. Соколовский //Метрология и метрологическое обеспечение: тезисы докладов Междунар. науч. техн. конф., Минск, 26-27 апреля 2007 года / Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь (Госстандарт) [и др.]; Ред. В.Н. Корешков [и др.]. – Минск, 2007. – С.25 – 29.

23. Соколовский, С.С. Специальные электроконтактные измерительные преобразователи/ С.С. Соколовский, В.Л. Соломахо, Д.В. Соломахо // Метрология и метрологическое обеспечение: тезисы докладов Междунар. науч. техн. конф. г. Минск, 26 – 27 апреля 2007 г. / Государственный комитет по

стандартизации Республики Беларусь (Госстандарт) [и др.]; Ред. В.Н. Корешков [и др.]. – Минск, 2007. – С.318 – 321.

24. Соколовский, С.С. Классификация метрологических моделей / С.С. Соколовский, Д.В. Соломахо, Е.А. Герман // Наука – образованию, производству, экономике: материалы VIII Междунар. науч. техн. конф.; Минск, 28.01.2010 / БНТУ; редкол. Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2010. – Т.4. – С.341.

Патенты Республики Беларусь и поданные заявки на патенты

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Устройство для измерения геометрических параметров сферических элементов детали / Д.В. Соломахо, С.С. Соколовский, Е.А. Кундикова // Заявка на патент № а20091386 от 29.09.2009.

РЭЗІЮМЭ

Саламаха Дзмітрый Уладзіміравіч

Метралагічнае забеспячэнне аперацыйнага кантролю геаметрычных параметраў дэталей машынабудавання на базе комплекснага падыходу да метралагічнага мадэлявання

Ключавыя словы: аперацыйны кантроль, вымярэнне, геаметрычныя параметры, паверхні, нарміраванне дакладнасці, метралагічнае мадэляванне.

Аб'ектамі даследавання з'яўляюцца метадалогія і практыка працэсу вымяральнага аперацыйнага кантролю геаметрычных параметраў дэталей машынабудавання. У якасці прадмета даследавання разглядаюцца аб'екты, сродкі і працэсы вымеральнага аперацыйнага кантролю геаметрычных параметраў дэталей машынабудавання. Мэта работы складаецца ў развіцці тэорыі і распрацоўцы асноў практычнай рэалізацыі метралагічнага забеспячэння аперацыйнага кантролю геаметрычных параметраў дэталей машынабудавання на базе комплекснага падыходу да метралагічнага мадэлявання. У часе даследавання былі распрацаваны і выкарыстаны прыёмы метралагічнага мадэлявання, прымяняўся апарат тэорыі імавернасцей і матэматычнай статыстыкі, аналітычнай геаметрыі.

У дысертацыйнай рабоце прапанавана выкарыстоўваць апарат комплекснага метралагічнага мадэлявання працэсаў, аб'ектаў і сродкаў аперацыйнага кантролю пры распрацоўцы элементаў метралагічнага забеспячэння кантролю геаметрычных параметраў дэталей машынабудавання.

Метралагічнае мадэляванне працэсаў аперацыйнага кантролю дазволіла нарміраваць пагрэшнасць вымярэнняў, зыходзячы з патрабаванняў дакладнасці вынікаў кантролю з улікам стабільнасці тэхналагічнага працэсу. Паказана, што дапушчальныя хібнасці вымярэнняў пры стабільным тэхналагічным працэсе істотна ніжэй, чым тыя, што прымяняюцца ў цяперашні час у метралагічнай практыцы.

Выкарыстоўванне метралагічных мадэляў аб'ектаў аперацыйнага кантролю дазваляе праектаваць метадыку выпאўнення вымярэнняў зыходзячы з дапусцімай метадычнай састаўляючай пагрэшнасці. Паказана, што выкарыстоўванне метралагічных мадэляў дазваляе ідэнтыфіцыраваць кантраліруемыя паверхні ў выпадку, калі іх від не вядомы апрыйёрна, а таксама мінімізаваць колькасць кантрольных кропак, патрэбных для пабудовы мадэлі. Гэта стварае прадпасылкі для праектавання спецыяльных сродкаў вымярэнняў.

Вынікі работы знайшлі практычнае выкарыстанне ў прамысловасці і падрыхтоўцы кадраў, што пацверджана актамі ўкаранення.

РЕЗЮМЕ

Соломахо Дмитрий Владимирович

Метрологическое обеспечение операционного контроля геометрических параметров деталей машиностроения на базе комплексного подхода к метрологическому моделированию

Ключевые слова: операционный контроль, измерения, геометрические параметры, поверхности, нормирование точности, метрологическое моделирование.

Объектами исследования являются методология и практика процесса измерительного операционного контроля геометрических параметров деталей машиностроения. В качестве предмета исследования рассматриваются объекты, средства и процессы измерительного операционного контроля геометрических параметров деталей. Цель работы заключается в развитии теории и разработке основ практической реализации метрологического обеспечения операционного контроля геометрических параметров деталей на базе комплексного подхода к метрологическому моделированию. В ходе исследования были разработаны и использованы приемы метрологического моделирования, применялся аппарат теории вероятностей и математической статистики, аналитической геометрии.

В диссертационной работе предложено использовать аппарат комплексного метрологического моделирования процессов, объектов и средств операционного контроля при разработке элементов метрологического обеспечения контроля геометрических параметров деталей машиностроения.

Метрологическое моделирование процессов операционного контроля позволило нормировать погрешность измерения, исходя из требований достоверности результатов контроля с учетом стабильности технологического процесса. Показано, что допустимые погрешности измерений при стабильном технологическом процессе существенно ниже, чем применяемые в настоящее время в метрологической практике.

Применение метрологических моделей объектов операционного контроля позволяет проектировать методику выполнения измерений, исходя из допустимой методической составляющей погрешности. Показано, что использование метрологических моделей позволяет производить идентификацию контролируемых поверхностей в случае, если их вид не известен априорно, а также минимизировать количество контрольных точек, требуемых для построения модели. Это создает предпосылки для проектирования специальных средств измерений.

Результаты работы нашли практическое применение в промышленности и подготовке кадров, что подтверждено актами внедрения.

SUMMARY

Solomakho Dmitry

Metrological assurance of mechanical parts geometric properties operational inspection on the basis of complex approach to metrological modeling

Key words: operational inspection, geometrical properties, surfaces, tolerance design, metrological modeling

The object of research is the methodology and practice of the process of geometrical parameters of engineering components operational control. The subject of the study are considered objects, tools and processes for measuring operational control of the geometric parameters of parts. The purpose of this work is development of theory and implementation of metrological assurance of operational control on the basis of an integrated approach to metrological modeling. In the course of study new methods of metrological modeling were developed and used together with some well known methods of mathematical statistics and probability theory, analytical geometry.

It is proposed in the paper to use the approach of complex metrological modeling of processes, objects and means of operational control in order to design the elements of metrological assurance of geometrical parameters control.

Metrological modeling of operational control can be used to normalize possible measurement error based on the requirements of results reliability, taking into account the stability of the process. It is shown that the admissible measurement errors in a stable production process is substantially lower than currently used in metrological practice.

The use of meteorological models of the objects of operational control allows to design the method of measurement based on the valid methodological component of the error. Shown that the use of metrological models allows the identification of controlled surfaces if their appearance is not known a priori, as well as to minimize the number of control points required for model building. This creates prerequisites for the design of special measuring instruments.

The results of the work have found practical applications in industry and training, which is confirmed by application certificates.

