

На правах рукописи

**Тарасов Дмитрий Юрьевич**

**ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ИХ  
ИСПЫТАНИЯХ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ**

Специальность 05.11.15. «Метрология и метрологическое обеспечение»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

г. Москва – 2011 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы».

**Научный руководитель:**

**Доктор технических наук**

**С. А. Кононогов**

**Официальные оппоненты:**

**Доктор технических наук,  
профессор**

**В. И. Телешевский**

**Кандидат технических наук  
доцент**

**Н. П. Муравская**

**Ведущая организация:**

**ЗАО «Супертехприбор»**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП «ВНИИМС» по адресу: 119361, Москва, ул. Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор технических наук \_\_\_\_\_ В. Г. Лысенко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Измерительные комплексы находят в настоящее время широкое применение в различных областях деятельности, начиная от диагностики человека в медицинской практике и заканчивая участием в управлении глобальными системами (навигационными, экологическими и др.), причем от качества выдаваемой ими информации зависит в существенной мере эффективность функционирования этих систем. Качество выдаваемой измерительным комплексом информации определяется в основном тем, в какой мере на стадии его разработки научно-техническими и технологическими решениями конструкторов удается достичь требуемого качества самого измерительного комплекса. Эффективность этих решений невозможно проверить без проведения многочисленных испытаний макетов и опытных образцов разрабатываемого измерительного комплекса, при этом его качество оценивается мерой близости его характеристик (метрологических, технических, эксплуатационных) к их номинальным значениям. Особая роль при этом отводится применяемым для испытаний техническим средствам (средствам измерений и испытательному оборудованию), которые в соответствии с Федеральным законом «Об обеспечении единства измерений» должны удовлетворять обязательным требованиям по показателям точности.

Необходимо отметить, что с ростом сложности измерительных комплексов, повышением их качества увеличиваются и затраты на проведение испытаний. До некоторого времени, пока предотвращенные потери заказчика и производителя измерительного комплекса вследствие устранения выявленных в ходе его испытаний несоответствий значительно превышали по возможным последствиям затраты предприятия на организацию и проведение испытаний, данная ситуация не требовала искать способы ее разрешения. Однако на современном этапе, когда затраты на организацию и проведение испытаний достигают в ряде случаев до 40 % от общих затрат на разработку измерительного комплекса, возникает противоречие между двумя важными составляющими эффективности производства – качеством создаваемых измерительных комплексов и издержками на их создание, поскольку увеличение достоверности результатов испытаний для повышения качества измерительных комплексов неизбежно увеличивает затраты предприятия на их производство, причем тенденция в увеличении доли затрат на испытания сохранится в ближайшие годы, что будет приводить к дальнейшему усилению указанного противоречия.

Практика свидетельствует, что и достоверность оценки характеристик измерительного комплекса в процессе испытаний, и издержки производства на испытания зависят в большой степени от погрешности определения фактических значений его характеристик, поэтому разрешение противоречия между стремлением предприятия к повышению качества создаваемого комплекса, и сопровождающимся при этом ростом его издержек возможно путем определения таких значений погрешности измерений характеристик комплекса, при которых обеспечивается рациональное соотношение между его качеством и затратами на его испытания.

Для разрешения указанного противоречия необходим научно-методический аппарат, позволяющий, с одной стороны, оценивать влияние погрешности измерения характеристик измерительного комплекса в процессе испытаний на его качество и, с другой стороны, определить зависимость затрат на организацию и проведение испытаний и потерь предприятия из-за ошибочных решений при испытаниях комплекса, от погрешности измерения его характеристик.

Математические модели, устанавливающие зависимость показателей достоверности испытаний от объема испытаний, разработаны учеными Бусленко Н.П., Железновым И.Г., Бондаревским А.С.

Исследования влияния погрешности измерения контролируемых параметров технических систем на вероятности ошибочных решений при их контроле проводились в работах Сычева Е.И., Асеева Б.Е., Швыдуна В.В.

Зависимости затрат на проведение измерений от показателей их точности исследовались в работах Новицкого П.В., Рубичева Н.А., Фрумкина В.Д.

Наиболее близкой по постановке являются исследования Земельмана М.А., Цейтлина В.Г., Кашлакова В.М., Кузнецова В.П. и других ученых, посвященные разработке способов использования результатов измерений при испытаниях технических систем и анализу влияния их погрешности на достоверность испытаний. Результаты этих исследований положены в основу разработанной ФГУП ВНИИМС Рекомендации МИ – 1317 – 2004.

Однако в указанных научно-методических подходах к исследованию процедуры испытаний технических систем задача обоснования требуемой точности определения характеристик измерительных комплексов при их испытаниях не рассматривалась, поэтому разработка метода обоснования требуемой точности определения их характеристик при испытаниях, которая обеспечива-

ет минимальные издержки предприятия, обусловленные затратами на проведение испытаний и потерями от ошибочных решений по оценке соответствия фактических значений их характеристик установленным требованиям, при условии, что качество комплекса, прошедшего испытания, будет не ниже заданного, является **актуальной научной задачей**, имеющей существенное значение для совершенствования научно- методических и технико-экономических основ метрологического обеспечения, направленного на повышение качества продукции и эффективности производства.

По своей постановке и области исследования поставленная научная задача соответствует формуле специальности 05.11.15. «Метрология и метрологическое обеспечение» (п.п. 1 и 2 области исследования).

**Объектом исследований** в диссертации являются процедуры оценки соответствия фактических значений характеристик измерительных комплексов установленным требованиям при их испытаниях в процессе разработки.

В качестве **предмета исследований** в диссертации рассматриваются методы обоснования рациональных значений показателей точности определения характеристик измерительных комплексов при их испытаниях.

**Целью исследований** является повышение качества создаваемых измерительных комплексов и эффективности производства на основе установления рациональных показателей точности определения характеристик измерительных комплексов при их испытаниях в процессе разработки.

Для достижения поставленной цели в диссертации сформулированы и решены следующие **частные научные задачи**:

1. Проведен анализ моделей испытаний измерительных комплексов, обоснован показатель эффективности процедуры их испытаний.

2. Разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние погрешности определения характеристики измерительного комплекса при его испытаниях на величину ее отклонения от предельно допустимых значений при условии, что в результате испытаний значение характеристики признано находящимся в допустимых пределах.

3. Получена математическая зависимость вероятностей ошибочных решений при оценке соответствия характеристики измерительного комплекса установленным требованиям от результирующей погрешности определения значения этой характеристики.

4. Разработана математическая модель, устанавливающая зависимость точностных параметров испытательного оборудования и погрешности средств измерений от показателей процедур их аттестации и поверки соответственно.

5. Обоснован критерий оптимальности процедуры определения характеристик измерительного комплекса при испытаниях, разработана структура модели расчета затрат предприятия на его испытания.

В ходе решения частных научных задач получены **новые научные результаты**:

1. На основе анализа математических моделей испытаний, исходя из концепции качества объекта испытаний как меры близости его оцениваемых характеристик к их номинальным значениям, предложены показатели эффективности процедуры испытаний измерительного комплекса.

2. Получена зависимость среднего значения величины отклонения характеристики, оцениваемой в ходе испытаний измерительного комплекса, за ее предельно допустимые значения при ошибочном признании в результате испытаний его характеристики соответствующей требованиям, от погрешности определения ее значения.

3. Разработана математическая модель, устанавливающая зависимость вероятностей принятия ошибочных решений при испытаниях о соответствии характеристик измерительного комплекса установленным требованиям, от погрешности определения фактических значений характеристик назначения объекта, точности формирования испытательных воздействий и реакции (степени влияния) оцениваемой характеристики на неточность соответствующих воздействий.

4. Разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние параметров процедур аттестации испытательного оборудования и поверки средств измерений, а также их надежностных характеристик на точность формирования испытательных воздействий и погрешности измерений характеристик назначения объекта испытаний.

5. Обоснованы составляющие функции затрат предприятия на организацию и проведение испытаний измерительных комплексов и установлены параметры системы испытаний, от которых они зависят.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Эффективность процедуры испытаний предложено оценивать средним значением величины отклонения характеристики измерительного комплекса от

ее предельно допустимых значений, при условии, что комплекс по результатам испытаний ошибочно признан соответствующим требованиям.

2. Получена зависимость среднего значения величины отклонения характеристики измерительного комплекса от ее предельно допустимых значений, которое в результате испытаний не было обнаружено, от погрешности определения фактического значения характеристики.

3. При установлении зависимости вероятностей ошибок первого и второго рода от точностных показателей системы испытаний предложено учитывать, кроме погрешности определения фактических значений характеристик измерительного комплекса и погрешности формирования испытательных воздействий, динамику погрешностей применяемых при испытаниях технических средств.

4. Разработанная математическая модель, устанавливающая зависимость погрешностей определения оцениваемых характеристик измерительного комплекса и точности формирования испытательных воздействий при его испытаниях от точностных и надежностных параметров испытательного оборудования и средств измерений, учитывает периодичность их аттестации и поверки, а также погрешности применяемых при аттестации средств измерений.

5. Математическая модель расчета затрат предприятия на организацию и проведение испытаний измерительного комплекса учитывает затраты предприятия на приобретение испытательного оборудования и средств измерений, их периодическую аттестацию и поверку соответственно, а также затраты предприятия, вызванные ошибками первого и второго рода в ходе испытаний измерительного комплекса.

**Обоснованность и достоверность** полученных в диссертации научных результатов обеспечивается корректностью постановки задачи исследований и принятых допущений, использованием при решении частных задач исследований апробированного математического аппарата исследований, широкой апробацией результатов исследований на конференциях различного уровня и подтверждается результатами математического моделирования и актами реализации научных результатов.

#### **Практическая ценность:**

1. Разработанный метод обоснования требуемых значений погрешностей определения характеристик измерительных комплексов при их испытаниях в процессе их создания позволяет обеспечить минимальные затраты разработчи-

ка (производителя) измерительных комплексов на организацию и проведение испытаний при обеспечении заказчику (пользователю) требуемого их качества.

2. Предложенный в диссертации подход к определению меры качества измерительного комплекса в виде величины отклонения его характеристик от требуемых значений может служить критерием эффективности предприятий, разрабатывающих и производящих измерительные комплексы, при проведении их инспекционного контроля, аудита и т.д.

**Методы исследований.** При проведении исследований использовался математический аппарат теории вероятностей, теории погрешностей, теории чувствительности, математического моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Качество измерительного комплекса, оцениваемое при испытаниях средними значениями отклонений значений его характеристик от их предельно допустимых значений, зависит от точности определения их фактических значений, при условии, что на основе результатов испытаний комплекс отнесен к категории соответствующих установленным требованиям, тогда как в действительности он им не соответствует.

2. Достоверность испытаний измерительного комплекса, характеризующая вероятностями принятия ошибочных решений по результатам испытаний, зависит от результирующей погрешности определения фактических значений его характеристик, которая представляет собой композицию законов распределения погрешности определения характеристики комплекса, находящегося в условиях соответствующих испытательных воздействий, неточности их формирования, степень влияния этих воздействий на соответствующую характеристику комплекса и динамику погрешности технических средств, применяемых при его испытаниях.

3. Результирующая погрешность определения фактических значений характеристик измерительного комплекса при испытаниях должна учитывать точностные и надежностные параметры испытательного оборудования и средств измерений, используемых при испытаниях, периодичность их аттестации и поверки соответственно, а также погрешность используемых при этом средств измерений.

4. Оптимальные значения результирующей погрешности определения характеристик измерительного комплекса при его испытаниях должны обеспечивать минимум затрат предприятия на организацию и проведение его испыта-



ний при условии, что среднее значение отклонения характеристики комплекса от ее предельно допустимых значений не превысит наперед заданного, что позволяет на 30 – 35 % сократить затраты на испытания при обеспечении заданного качества создаваемого комплекса.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на:

- 4-ой Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение испытаний специальной техники», 2003 г.;

- 5-й и 6-й Всероссийских научно-технических конференциях «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», 2004 г. и 2006 г.;

- 27-й и 28-й научно-технических конференциях молодых ученых 32 ГНИИ МО РФ, 2004 г. и 2005 г.

**Результаты работы внедрены:**

1. В Рекомендации «Порядок проведения метрологической экспертизы программы и методик аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации. МИ 32/004 - 04;

2. В Рекомендации «Разработка программ и методик аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации». МИ 32 /003 - 04.

3. При разработке программ и методик аттестации более 120 типов испытательного оборудования, в том числе 20 стендов, воспроизводящих воздействия механических факторов, 78 стендов, воспроизводящих воздействия климатических факторов, 9 - воздействия радиационных, электрических и электромагнитных факторов и 15 - комплексных факторов.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 8 статей, 2 методики института, 6 отчетов о НИР.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 134 страниц, 5 таблиц, 23 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и частные задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проведен анализ цели и задач метрологического обеспечения испытаний измерительных комплексов. Анализ показал, что требуемые потребительские свойства измерительного комплекса должны сохраняться в течение всего срока его службы, что практически невозможно без проведения многочисленных измерений его параметров и характеристик. Организация и проведение этих измерений являются задачами метрологического обеспечения измерительного комплекса, причем достижение и поддержание его требуемых потребительских свойств зависит не только от точности измерений его параметров, но определяется также и другими характеристиками измерений, в частности, продолжительностью, объемом, периодичностью, стоимостью, трудоемкостью и т.д. В частности, при разработке и испытаниях измерительного комплекса его качество в значительной степени определяется точностью и продолжительностью измерений, а целесообразность и возможность использования тех или иных методов и средств измерений устанавливаются с учетом стоимости измерений и сложности их технической реализации.

Системный подход к метрологическому обеспечению разработки измерительных комплексов позволил определить цель метрологического обеспечения как достижение и поддержание их высоких эксплуатационных свойств, эффективности, надежности, увеличение срока службы. С учетом этого исследованы известные модели испытаний измерительных комплексов, в результате которых в диссертации сформулирована цель испытаний измерительного комплекса, заключающаяся в определении его качества путем оценки фактических значений его характеристик и сравнения их с требуемыми значениями. При этом под качеством комплекса в диссертации понимается мера близости фактических значений его характеристик к их номинальным значениям.

В диссертации показано, что оценка степени этого приближения в значительной степени зависит от точности формирования испытательных воздействий, выбора измеряемых параметров, средств измерений, испытательного оборудования и их технического состояния. На достоверность испытаний в большой степени влияет адекватность эксперимента реальным условиям применения комплекса. В соответствии с этим в диссертации схема испытаний представлена на рисунке 1.1 в виде двух подсистем:

- подсистема реализации заданного класса состояний комплекса;
- подсистема получения информации о фактическом его состоянии.

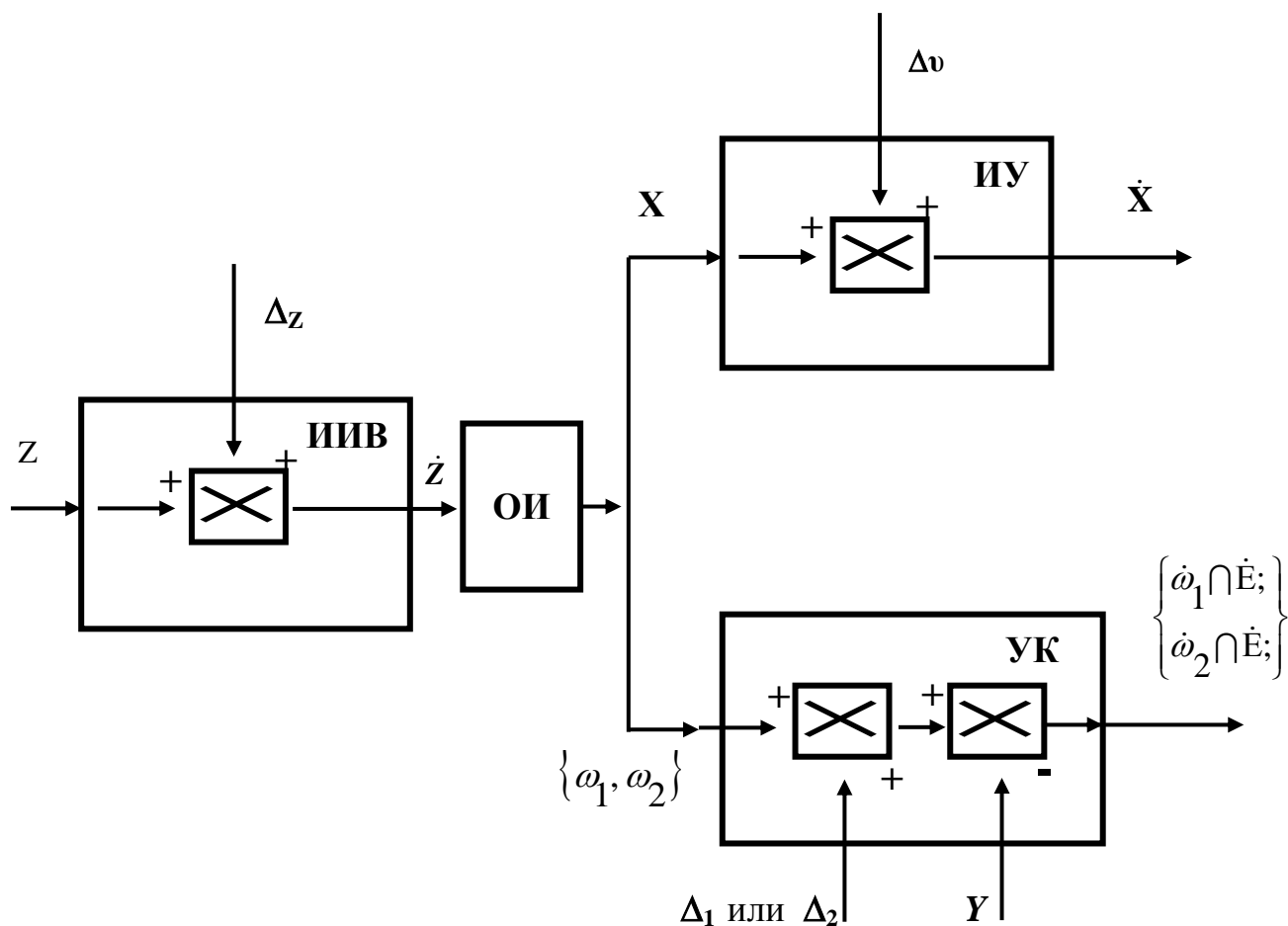


Рисунок 1.1. Структурная схема системы испытаний.

В источнике испытательных воздействий (ИИВ) формируется заданное в программе испытаний воздействие  $Z$  с погрешностью  $\Delta_z$ , которое переводит

объект испытаний (ОИ) в заданный класс состояний. Реакция ОИ на воздействии  $\dot{Z}$  в виде значения его характеристики назначения  $X$  в измерительном устройстве (ИУ) преобразуется оценку его характеристики  $\dot{X}$ , с погрешностью  $\Delta u$ .

В общем случае система испытаний измерительного комплекса предполагает наличие устройства контроля (УК), регистрирующего качественные значения его реакции на воздействия  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (события «годность» и «дефектность») относительно производственной нормы  $Y$ . Поскольку устройство контроля имеет определенные погрешности  $\Delta_1$  при переключениях «дефектность – годность» и  $\Delta_2$  при переключении «годность – дефектность», то результаты контроля  $\dot{\omega}_1$  и  $\dot{\omega}_2$  будут принадлежать классу состояний  $\dot{E}$ , так что  $\omega_1 \cap \dot{E} = \omega_1 \cap (\dot{\omega}_1 \cup \dot{\omega}_2)$ ,  $\omega_2 \cap \dot{E} = \omega_2 \cap (\dot{\omega}_1 \cup \dot{\omega}_2)$ .

В диссертации показано, что параметры технического состояния измерительного комплекса в каждый момент испытаний являются результатом не только процесса его функционирования, но и воздействия на него различных контролируемых и неконтролируемых факторов. Исходя из этого, модель измерительного комплекса как объекта испытаний в виде вектора его характеристик представляется в диссертации следующим образом:

$$\Theta_{исп} = D_K \cdot \Theta_K + \bar{\Psi} \cdot U_K + \Omega_K \cdot W_K + \lambda \cdot \delta_K, \quad (1.1)$$

где,  $\Theta_{исп}$  - вектор характеристик измерительного комплекса;

$D_K$  - матрица, определяющая динамику состояния комплекса;

$\Theta_K$  -  $n$ - мерный вектор параметров комплекса в  $k$ -ый момент времени, по которым оцениваются его характеристики;

$U_K$  - вектор внешних воздействий, создаваемых с помощью специальных технических средств;

$W_K$  - вектор случайных внешних воздействий;

$\delta_K$  - случайные изменения характеристик комплекса;

$\Psi$ ,  $\Omega$ ,  $\lambda$  - матрицы проектирования соответствующих факторов на характеристики комплекса.

**Во второй главе** диссертации обоснованы показатели эффективности процедуры испытаний измерительного комплекса. Поскольку результатом испытаний, в конечном счете, является оценка соответствия значений характеристик измерительного комплекса их требуемым значениям в реальных условиях

его будущей эксплуатации, показателем эффективности испытаний в диссертации выбрана величина отклонения оцениваемой характеристики комплекса, находящейся за пределами допуска, но ошибочно признанной по результатам испытаний находящейся в допуске, от ее предельно допустимого значения. Кроме того, большие длительность и стоимость испытаний, особенно для сложных измерительных комплексов, делают актуальным обеспечение рационального соотношения затрат на испытания к общим затратам на создания объекта. Отсюда следует, что параметры процедуры испытаний должны выбираться с учетом общих затрат на их организацию и проведение.

Поскольку эти два показателя, как показано в диссертации, несоизмеримы, предложено использовать для обоснования необходимой точности определения характеристик измерительного комплекса при его испытаниях комплексный показатель, в котором минимизируются затраты на испытания при ограничениях на допустимую величину отклонения оцениваемой характеристики комплекса от допустимых пределов.

На рисунке 2.1 приведены «качественные» зависимости двух составляющих затрат предприятия на проведение испытаний от результирующей точности измерений при испытаниях: потерь предприятия от неправильных решений при испытаниях объекта и его затрат на организацию и проведение испытаний.

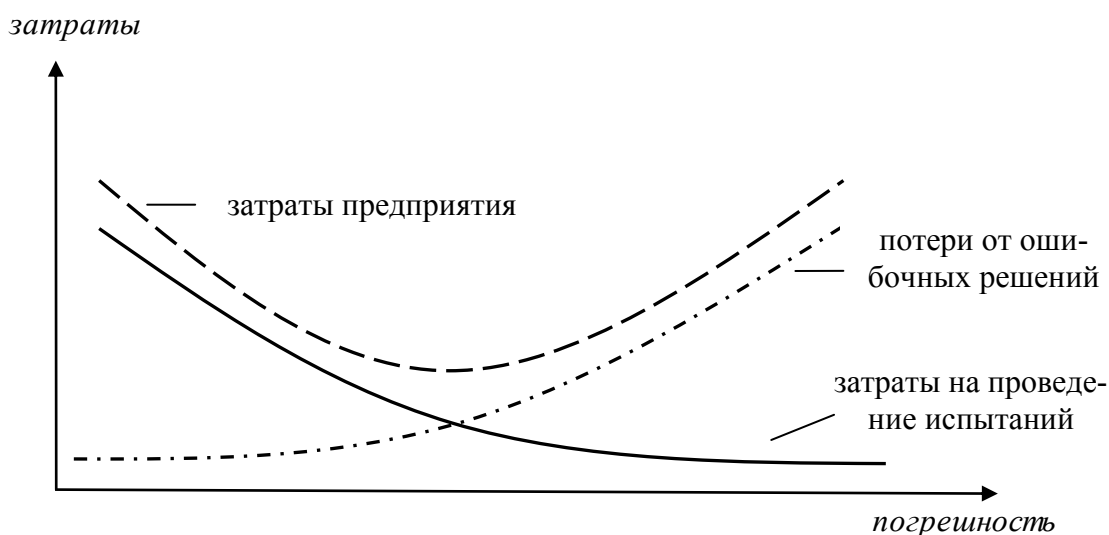


Рисунок 2.1. Затраты предприятия на испытания.

Как следует из приведенных зависимостей, существует такая точность определения характеристик комплекса при испытаниях при которой суммарные затраты предприятия на проведение испытаний будут минимальными.

Чтобы учесть интересы заказчика (потребителя), заключающиеся в достижении высокого качества разрабатываемого комплекса, в задачу оптимизации погрешности определения его характеристик при испытаниях необходимо ввести ограничения на их отклонения от допустимых значений. С учетом этого она принимает следующий вид:

$$\min M \left[ \prod (z + \Delta_z; x + \Delta_v) \right] \text{ при } x \subset x_{TP}, \quad (2.1)$$

где,  $M [\prod (z + \Delta_z; x + \Delta_v)]$  – операция математического ожидания;

$\prod (z + \Delta_z; x + \Delta_v)$  – затраты предприятия на испытания;

$z$  – вектор испытательных воздействий;

$\Delta_z$  – погрешность формирования испытательных воздействий;

$x$  – вектор характеристик измерительного комплекса при испытаниях;

$\Delta_v$  – погрешность определения характеристик измерительного комплекса;

$x_{TP}$  – требуемые значения характеристик комплекса.

Для решения задачи оптимизации (2.1) в диссертации исследовано влияние погрешности определения характеристик измерительного комплекса на его качество. Оценка характеристик комплекса при испытаниях представлена в виде суммы следующих случайных величин:

- реакции характеристики измерительного комплекса на испытательное воздействие, которую с учетом погрешности формирования испытательного режима в диссертации описывается плотностью распределения  $f(z)$ ;

- результата измерения характеристики комплекса при испытаниях с погрешностью, описываемой плотностью распределения  $f(v)$ .

В случае их независимости результирующая погрешность определения характеристики комплекса при испытаниях будет определяться по формуле:

$$f(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_z(z) \cdot f_v(y - z) dz, \quad (2.2)$$

Для определения величины отклонения характеристики измерительного комплекса при испытаниях от допустимых пределов в зависимости от погрешности ее определения в диссертации использован подход, сущность которого проиллюстрирована на рисунке 2.2.

Пусть характеристика комплекса, определяющая его качество, имеет плотность распределения  $f(x)$ , а ее значение для нормального функционирования

ния комплекса должно находиться в пределах от  $x_n$  до  $x_6$ . Рассмотрим случай, когда значение характеристики находится за пределами допуска (для конкретности, превышает величину  $x_6$ ). Из-за наличия погрешности (2.2) существует вероятность того, что результат испытаний окажется положительным (заштрихованная площадь на рисунке 2.2). Такое событие в теории статистического контроля называется «ошибкой второго рода».

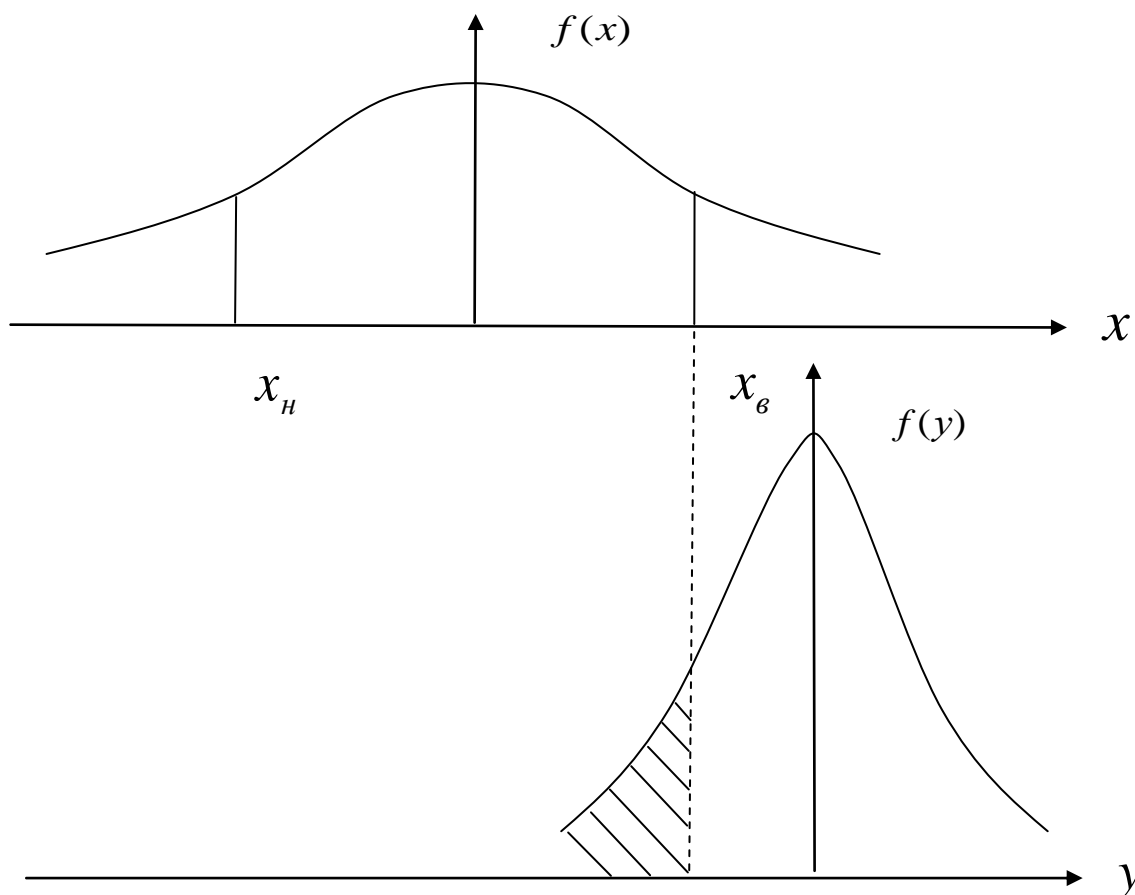


Рисунок 2.2. Определение точности оценки характеристики комплекса при испытаниях.

Условная плотность вероятности того, что случайная величина  $x$ , находящаяся за пределами допусков, по результатам испытаний будет признана находящейся в допуске, в соответствии с интегральной формулой Байеса будет определяться следующим выражением:

$$f(x_{но}) = \begin{cases} f(x) \cdot \int_{x_n - x}^{x_6 - x} f(y) dy & \text{при } x \notin [x_n; x_6]; \\ 0 & \text{при } x \in [x_n; x_6]. \end{cases} \quad (2.3)$$

Среднее значение случайной величины  $x$  будет определяться по известным выражениям для математического ожидания по формуле:

$$\bar{x}_{но} = \int_{-\infty}^{\infty} |x| \cdot f(x_{но}) dx, \quad (2.4)$$

На рисунке 2.3 приведены графики, показывающие влияние результирующей погрешности  $f(y)$  при нормальном законе распределения на относительное среднее значение отклонение характеристики назначения объекта испытаний от границы допусков при совершении ошибки второго рода в ходе испытаний, рассчитываемое по формуле:

$$\bar{x}_{отн} = \frac{\bar{x}_{но} - x_{г}}{x_{г}}, \quad (2.4)$$

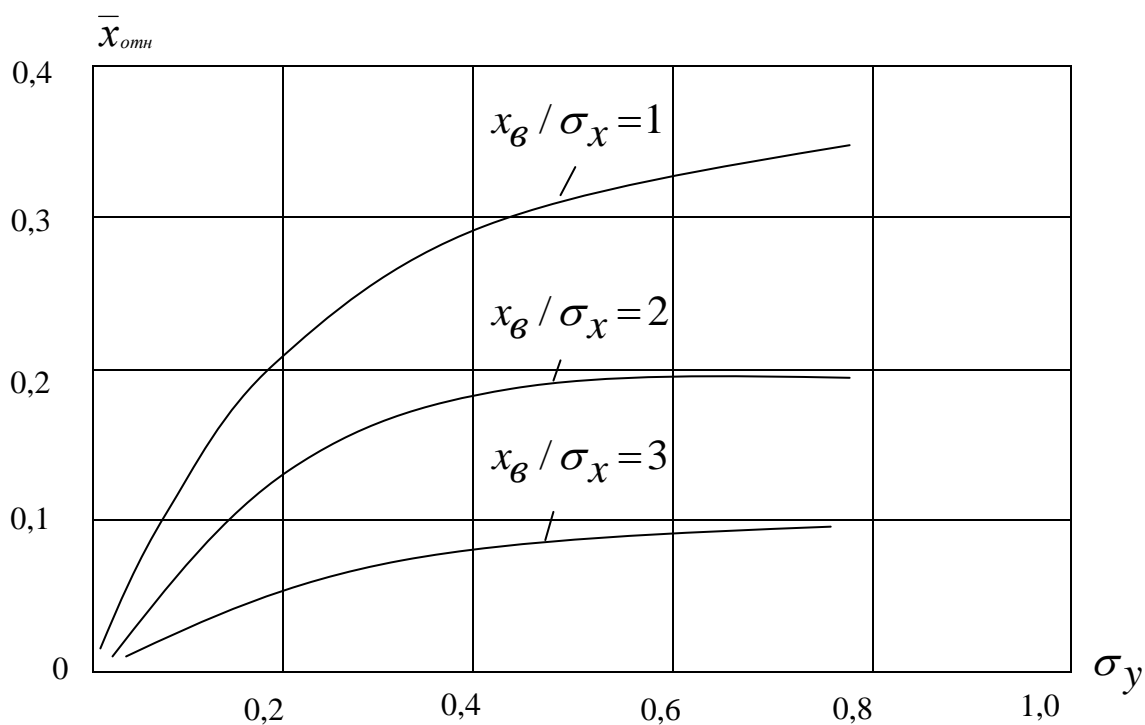


Рисунок 2.3. Зависимость относительного среднего значения отклонения характеристики комплекса от допустимых пределов при испытаниях от результирующей погрешности.

Как видно из графиков, это влияние тем больше, чем меньше соотношение между допустимым отклонением характеристики комплекса и ее средним квадратическим отклонением.



На рисунке 2.4 показана зависимость относительного среднего значения отклонения характеристики комплекса от допустимых пределов от величины вероятности ошибки второго рода при испытаниях.

Характер приведенных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что относительное среднее значение отклонения характеристики измерительного комплекса от допустимых пределов при испытаниях существенно зависит от вероятности ошибки второго рода, причем эта зависимость тем больше, чем меньше отношение допустимого отклонения характеристики к ее среднему квадратическому отклонению.

Ошибка первого рода, напротив, не приводит к ухудшению качества разрабатываемого комплекса, однако она существенно влияет на эффективность работы производителя, поскольку возрастают его затраты на поиск несуществующих у испытуемого комплекса несоответствий.

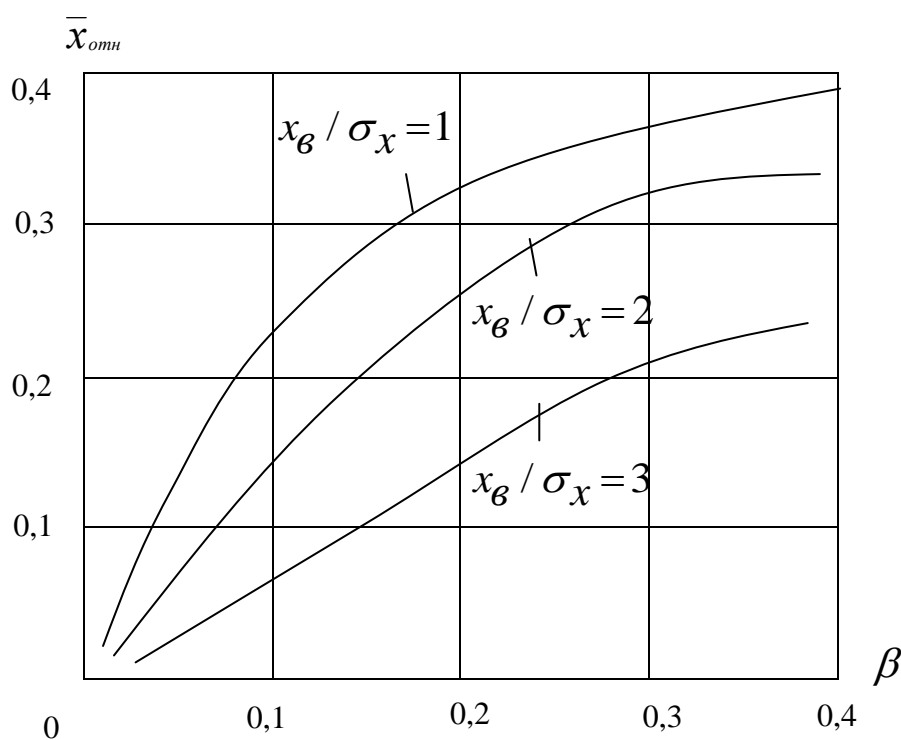


Рисунок 2.4. Зависимость относительного среднего отклонения характеристики назначения объекта испытаний от вероятности ошибки второго рода.

**В третьей главе** диссертации разработана математическая модель, устанавливающая зависимость результирующей погрешности  $f(y)$ , обусловленной процедурой испытаний, от точностных и надежностных характеристик испытательного оборудования, применяемых при испытаниях средств измерений, а также параметров процедуры периодической аттестации испытательного обо-

рудования и поверки средств измерений соответственно. В диссертации показано, что точностные и надежностные характеристики испытательного оборудования и средств измерений можно представить в виде случайных функций времени, плотности распределения которых имеют следующий вид:

$$f(z, t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_z(t)}} \cdot \exp \left( -\frac{z^2}{2 \cdot \sigma_z(t)^2} \right), \quad (3.1)$$

$$f(v, t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_v(t)}} \cdot \exp \left( -\frac{v^2}{2 \cdot \sigma_v(t)^2} \right), \quad (3.2)$$

где,  $\sigma_z(t) = \sigma_{z0} + B_z \cdot t$ ;  $\sigma_v(t) = \sigma_{v0} + B_v \cdot t$ .

$\sigma_{z0}$ ,  $\sigma_{v0}$  - среднее квадратическое отклонение точностных характеристик по ансамблю типовых образцов испытательного оборудования и средств измерений соответственно, признанных удовлетворяющими требованиям при последней аттестации (поверке);

$t$  - время, прошедшее от последней аттестации (поверки);

$B_z$ ,  $B_v$  - коэффициенты, характеризующие скорость изменения точностных характеристик испытательного оборудования и средств измерений соответственно.

Как показано в диссертации, величина  $\sigma_0$  зависит от достоверности аттестации (поверки). В ходе аттестации (поверки) из-за конечной точности используемых при этом технических средств возможны ошибки в виде необнаруженного отказа, когда неработоспособное испытательное оборудование (средство измерений) признается работоспособным, и ошибки в виде ложного отказа, когда работоспособное испытательное оборудование (средство измерений) признается неработоспособным.

Пусть суммарная погрешность используемых при аттестации (поверке) технических средств имеет плотность распределения  $f(s)$ , тогда в процессе аттестации (поверки) распределение  $f(z, t)$  или  $f(v, t)$  будет трансформироваться в условное распределение следующим образом:

$$f(z/A) = f(z, T_A) \cdot \left( 1 - \left[ \int_{-\infty}^{z_H - z} f(s) ds + \int_{z_E - z}^{\infty} f(s) ds \right] \right), \text{ если } z \in [z_H; z_E], \quad (3.3)$$

$$\text{или } f(z/B) = f(z, T_A) \cdot \left( \int_{z_H - z}^{z_E - z} f(s) ds + \int_{z_E - z}^{\infty} f(s) ds \right), \text{ если } z \notin [z_H; z_E].$$

где,  $A$  - событие, заключающееся в том, что  $z$  находится в интервале  $[z_H; z_B]$ ;  
 $B$  - событие, заключающееся в том, что  $z$  находится вне интервала  $[z_H; z_B]$ ;  
 $z_H, z_B$  - нижнее и верхнее предельно допустимые значения показателя точности испытательного оборудования.

Аналогичным образом будет трансформироваться условное распределение  $f(v, t)$ .

Используя выражение (3.3),  $\sigma_{z0}$  можно определить по известной формуле для дисперсии:

$$\sigma_{z0}^2 = \frac{1}{\rho} \cdot \left( \int_{-\infty}^{z_H} z^2 \cdot f(z/B) dz + \int_{z_H}^{z_B} z^2 \cdot f(z/A) dz + \int_{z_B}^{\infty} z^2 \cdot f(z/B) dz \right), \quad (3.4)$$

$$\text{где, } \rho = \int_{-\infty}^{z_H} f(z/B) dz + \int_{z_H}^{z_B} f(z/A) dz + \int_{z_B}^{\infty} f(z/B) dz$$

На рисунке 3.1 приведены графики, иллюстрирующие зависимость условного распределения  $\sigma_{z0}$  от среднего квадратического отклонения суммарной погрешности технических средств  $f(s)$  (среднее квадратическое отклонение погрешности испытательного оборудования в момент времени  $t = T_A$  принято равным 1).

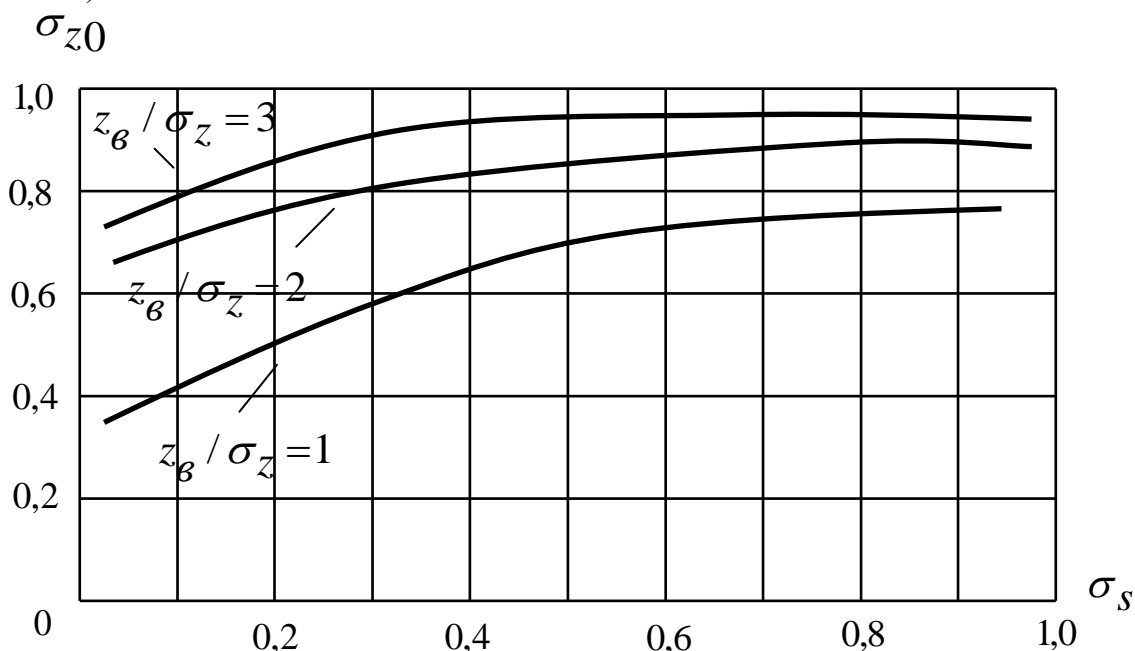


Рисунок 3.1. Зависимость среднего квадратического отклонения условного распределения точностных характеристик испытательного оборудования от погрешности применяемых при аттестации средств измерений.

Параметром кривых является отношение предельно допустимого отклонения погрешности испытательного оборудования к ее среднему квадратическому отклонению в момент аттестации. Как следует из графиков рисунка 3.1, при аттестации испытательного оборудования уменьшается дисперсия распределения его точностных характеристик, причем это уменьшение тем заметнее, чем меньше соотношение предела допускаемой погрешности испытательного оборудования к его среднему квадратическому отклонению.

На рисунке 3.2 приведены зависимости среднего квадратического отклонения точностных характеристик испытательного оборудования от величины интервала между аттестациями  $T_A$ .

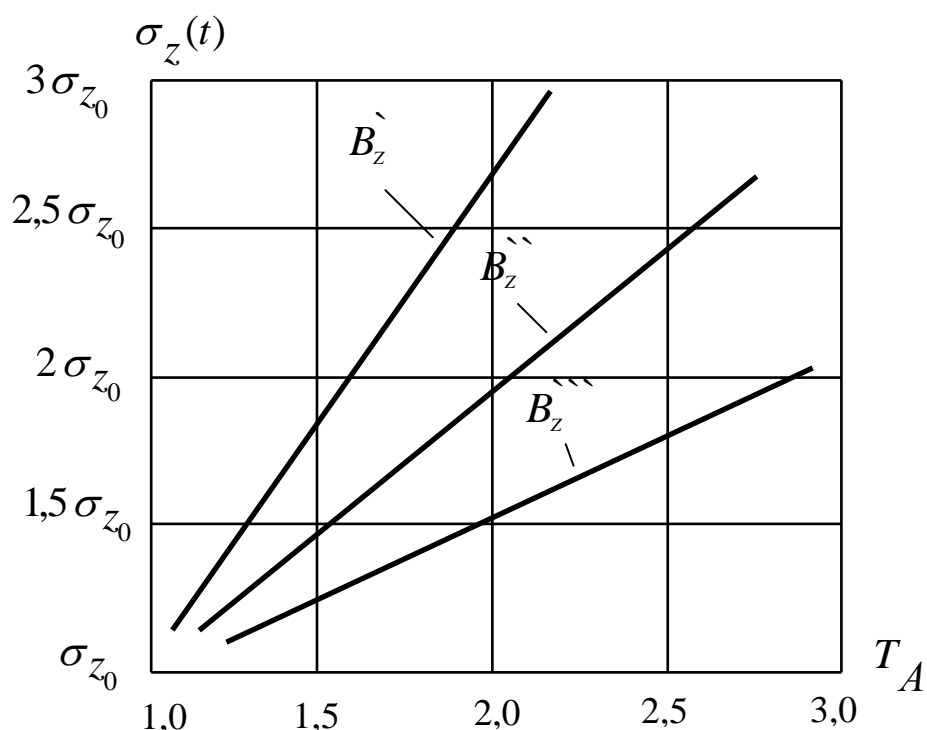


Рисунок 3.2. Зависимость среднего значения погрешности формирования испытательных воздействий за межаттестационный интервал от величины этого интервала при различных значениях коэффициента  $B$ .

Как следует из приведенных графиков, величина среднего квадратического отклонения погрешности испытательного оборудования существенно зависит от величины межаттестационного интервала  $T_A$  и скорости изменения его точностных характеристик, при этом при уменьшении  $B_A$  погрешность испытательного оборудования уменьшается.

В четвертой главе диссертации разработан метод расчета оптимальных значений показателей точности определения характеристик измерительного комплекса при его испытаниях. Критерий оптимальности, предложенный во второй главе, предусматривает минимизацию затрат разработчика измерительного комплекса на его испытания, при которых заказчику (потребителю) обеспечивается требуемое качество комплекса.

С учетом этого целевая функция в математической постановке задачи оптимизации (2.1) приобретает следующий вид:

$$П = C_{\alpha} + C_{\beta} + C_z + C_v, \quad (4.1)$$

где,  $C_{\alpha}$  - экономические затраты предприятия, вызванные ошибочным признанием характеристики измерительного комплекса по результатам его испытаний находящейся за пределами допуска;

$C_{\beta}$  - экономические затраты предприятия, обусловленные ошибочным признанием характеристики комплекса при испытаниях находящейся в пределах допустимых значений;

$C_z$  - экономические затраты предприятия на приобретение и периодическую аттестацию испытательного оборудования;

$C_v$  - экономические затраты предприятия на приобретение и периодическую поверку средств измерений, предназначенных для измерения характеристик комплекса при испытаниях.

Составляющую  $C_{\alpha}$  экономических затрат предприятия, обусловленную ошибочным бракованием комплекса при испытаниях, характеристики которого соответствуют установленным требованиям, в диссертации предложено определять следующим образом:

$$C_{\alpha} = k_{\alpha} \cdot \alpha, \quad (4.2)$$

где,  $k_{\alpha}$  - коэффициент пропорциональности, определяющий относительный вклад этих затрат в общие затраты предприятия на испытания.

Составляющая  $C_{\beta}$  экономических затрат предприятия, обусловленная обнаруженным при испытаниях выходом значений характеристик комплекса за допустимые пределы, определяется по формуле:

$$C_{\beta} = k_{\beta} \cdot \beta, \quad (4.3)$$

где,  $k_{\beta}$  - коэффициент пропорциональности, учитывающий относительный «вес» данных затрат в общих затратах предприятия на испытания.

Составляющие  $C_z$  и  $C_v$  зависят от средних значений дисперсий погрешности испытательного оборудования и средств измерений соответственно, применяемых при испытаниях измерительных комплексов, которые, в свою очередь, определяются, как показано в главе 3, погрешностями используемых при аттестации испытательного оборудования (поверке) технических средств, надежностью испытательного оборудования (средств измерений) и периодичностью их аттестации (поверки).

В диссертации показано, что выражения для составляющих  $C_z$  и  $C_v$  в зависимости от значений указанных выше параметров имеет следующий вид:

$$C_z = k_{z1} \cdot \sigma_{z0}^{k_{z2}} \cdot T_A^{k_{z3}} \cdot B_z^{k_{z4}}, \quad (4.4)$$

$$C_v = k_{v1} \cdot \sigma_{v0}^{k_{v2}} \cdot T_{mni}^{k_{v3}} \cdot B_v^{k_{v4}}, \quad (4.5)$$

Алгоритм определения оптимальных параметров процедуры испытаний, разработанный в диссертации, представлен на рис. 4.1. Варьируемые параметры при поиске минимума функции (4.1) указаны в блоке 1 алгоритма расчета оптимальной погрешности измерений при испытаниях, при этом диапазон допустимых вариаций переменных выбирается исходя из возможности их реализации современными техническими средствами. Параметры  $\sigma_s$ ,  $\sigma_{z0}$ ,  $\sigma_{v0}$ ,  $T_A$ ,  $B_A$ ,  $T_{МПИ}$ ,  $B_v$ , и  $x_{ТР}$  независимы между собой, поэтому для поиска минимума целевой функции (4.1) можно применить любой универсальный метод поиска экстремума. В этом случае для совокупности параметров блока 1, в которой один изменяется с определенным шагом, а остальные «заморожены», рассчитываются в блоках 2 и 3 значения  $\sigma_z$  и  $\sigma_v$ . Затем в блоке 4 исходя из значений варьируемых параметров определяются стоимости испытательного оборудования и затраты на его периодическую аттестацию, в блоке 6 рассчитываются аналогичные стоимости средств измерений и затраты на их поверку. В блоке 5 алгоритма вычисляется среднее квадратическое отклонение результирующей погрешности измерений, которое затем используется в блоках 7 и 8 алгоритма для расчета вероятности ошибочного забракования измерительного комплекса при испытаниях  $\alpha$  и вероятности ошибочного признания комплекса соответствующим требованиям  $\beta$ . В блоках 10 и 12 алгоритма рассчитываются затраты предприятия, обусловленные ошибочными решениями, принимаемыми при испытаниях комплекса. Одновременно в блоке 9 алгоритма по значению вероятности ошибки второго рода, определенной в блоке 8, рассчитывается величина отклонения характеристики комплекса, оцениваемой при испытаниях, от ее предельно до-

пустимых значений  $x_{отн}$ . Данная величина является ограничивающим условием в задаче оптимизации результирующей погрешности определения характеристик комплекса при испытаниях, и в блоке 11 она сравнивается со значением  $x_{ТР}$ , установленным заказчиком, как максимально возможное снижение его качества. Если фактическое значение  $x_{отн}$  меньше максимально возможного  $x_{ТР}$ , в блоке 14 вычисляется значение целевой функции, соответствующее данному вектору варьируемых параметров, формируется следующий шаг оптимизации и процесс поиска экстремума продолжается. Если же фактическое значение  $x_{отн}$  окажется больше максимально возможного  $x_{ТР}$ , в блоке 13 алгоритма формируется определенное, достаточно большое положительное число, которое суммируется со значением целевой функции. Это означает, что данный вектор варьируемых параметров не может рассматриваться в качестве оптимального, поскольку ограничения задачи (2.1) не выполняются.

Для анализа работоспособности предложенного в диссертации алгоритма поиска оптимальных погрешностей определения характеристик измерительного комплекса при испытаниях, а также для проверки «чувствительности» математической модели (4.1) и оптимального решения к исходным данным, в диссертации использованы «тестовые» зависимости затрат предприятия на испытания от варьируемых параметров. Было принято, что потери предприятия при совершении ошибки второго рода в  $S$  раз больше затрат, обусловленных ошибкой первого рода ( $S$  принимало значения 1, 2, 3, 4), затраты на приобретение и поддержание необходимого состояния испытательного оборудования в  $L$  раз выше, чем соответствующие затраты на средства измерений, причем  $L$  в расчетах принимало значения 1, 2, 3.

Поиск минимума функции затрат (4.1) проводился методом «покоординатного» спуска. Расчеты показали, что координаты минимума (оптимальные значения погрешности определения характеристик измерительного комплекса при его испытаниях) существенно зависят от коэффициентов функции (4.1). В таблице 4.1 приведены результаты оптимизации параметров процедуры испытаний для различных значений коэффициента  $S$  в функции потерь при  $L = 2$ .

Таблица 4.1.

$L = 2$						
$S$	$\sigma_y$	$\sigma_b$	$\sigma_z$	$\alpha$	$\beta$	П min
1	0,385	0,201	0,253	0,073	0,043	0,53
2	0,369	0,192	0,246	0,068	0,041	0,64
3	0,343	0,185	0,228	0,064	0,038	0,73
4	0,267	0,168	0,196	0,058	0,036	0,82

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что необходим объективный анализ всех составляющих функции затрат на испытания (4.1) для каждого предприятия, поскольку параметры оптимальной процедуры испытаний зависят от входящих в эти составляющие коэффициентов.

Оценка эффективности разработанного в диссертации метода обоснования требований к погрешности определения характеристик измерительных комплексов при испытаниях проведена путем оптимизации параметров процедуры испытаний измерительного комплекса для измерения мощности до 100 Вт в диапазоне частот до 17 ГГц. Согласно ТЗ на его разработку его дополнительная погрешность, вызванная отклонением температуры в рабочих условиях эксплуатации от нормальных условий, не должна превышать величины 0,5 основной погрешности на каждые 10 градусов отклонения температуры от ее нормальных значений.

Согласно программе и методике испытаний на первом этапе измерительных комплекс испытывают при нормальной температуре, затем его помещают в климатическую камеру и устанавливают сначала верхнее предельное значение рабочей температуры (60 °С), выдерживают при этой температуре не менее 3-х часов и проводят определение его дополнительной температурной погрешности в соответствии с методикой испытаний. Затем такую же процедуру проводят при нижнем предельном значении температуры (минус 50 °С).

Полученное значение дополнительной погрешности ваттметра сравнивается с допустимым, установленным заказчиком в ТЗ. Если в процессе испытаний будет установлено, что хотя бы одно требование ТЗ не выполняется, то вся партия, представленная на приемо-сдаточные испытания, считается не выдержавшей испытания, и она возвращается предъявителю для поиска причин несо-



ответствия ТЗ, их устранения и представления на повторные испытания. Результаты повторных испытаний являются окончательными.

В соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 4.1, проведен поиск минимума целевой функции, полученной согласно выражению (4.1) для конкретных исходных данных о измерительном комплексе и предприятию – разработчике. Оптимизация проводилась при условии, что вероятность ошибки второго рода, т.е. вероятность поставки заказчику ваттметров, имеющих дополнительную погрешность выше требуемой, должна быть не более 0,05.

Оптимальные параметры процедуры испытаний измерительного комплекса на соответствии его дополнительной погрешности измерения мощности, вызванной отклонениями рабочей температуры, требованиям заказчика, установленным в ТЗ, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2.

Варианты	$\sigma_z$	$\sigma_v$	$\sigma_\Sigma$	$T_A$	$T_{\text{мпи}}$	$\Pi = \Sigma C_i$
Существующий	3,20	0,60	3,75	1,00	1,00	740000
Оптимальный	2,20	1,30	3,60	2,07	1,70	550000

Там же приведены параметры процедуры его испытаний, соответствующие существующей программе и методике испытаний. Анализ полученных результатов показывает, что разработанный в диссертации метод определения требуемой точности определения дополнительной погрешности позволяет на 35 % уменьшить затраты предприятия на проведение испытаний и одновременно гарантировать заказчику получение партии измерительных комплексов для измерения мощности с наперед заданным уровнем качества.

### **ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ:**

1. Проведенный анализ моделей испытаний измерительных комплексов показал, что эффективность процедуры испытаний должна оцениваться комплексным показателем вида «качество измерительного комплекса – затраты на его испытания».

2. Качество измерительного комплекса в диссертации предложено оценивать средним значением отклонения его характеристик от их предельно допустимых значений при условии, что в результате испытаний измерительный комплекс был ошибочно признан соответствующим требованиям.

3. Обоснованы составляющие функции затрат на организацию и проведение испытаний измерительного комплекса и установлены параметры проце-

дуры испытаний, от которых они зависят. Математическая модель расчета затрат на организацию и проведение испытаний учитывает затраты предприятия на приобретение испытательного оборудования и средств измерений, их периодическую аттестацию и поверку соответственно, а также затраты, вызванные ложным бракованием комплекса и потери от необнаруженного выхода его характеристик за предельно допустимые значения.

4. Определены цели, задачи и содержание метрологического обеспечения испытаний измерительных комплексов. На этой основе выявлены параметры процедуры испытаний (достоверность оценки характеристик измерительного комплекса при испытаниях, стоимость испытаний), зависящие от показателей метрологического обеспечения, таких как погрешность применяемых при испытаниях технических средств, их стоимости, параметров системы их технического обслуживания.

5. Получено выражение для результирующей погрешности определения фактических значений характеристик измерительного комплекса, оцениваемых при его испытаниях, представляющее собой композицию погрешности воспроизведения испытательных воздействий и погрешности измерения реакции (отклика) комплекса на эти воздействия.

6. Получена зависимость среднего значения отклонения характеристики измерительного комплекса, оцениваемой в ходе его испытаний, от ее предельно допустимых значений при ошибочном признании в результате испытаний ее соответствующей требованиям, от результирующей погрешности определения фактического значения характеристики.

7. Разработана математическая модель, устанавливающая зависимость вероятностей принятия ошибочных решений о соответствии характеристик измерительного комплекса установленным требованиям, от результирующей погрешности определения фактических значений его характеристик.

8. Разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние параметров процедур аттестации испытательного оборудования и поверки средств измерений, а также их надежность характеристик на результирующую погрешность определения характеристик измерительного комплекса, оцениваемых при испытаниях.

9. Требуемая погрешность определения значений характеристик измерительного комплекса, оцениваемых при его испытаниях, выбирается исходя из минимизации затрат на организацию и проведение испытаний комплекса при

условии, что среднее значение отклонения его характеристики от ее предельно допустимых значений будет не больше заданного.

10. Разработан алгоритм поиска минимума функции затрат на организацию и проведение испытаний измерительного комплекса в соответствии с предложенным в диссертации методом обоснования требуемой погрешности определения значений его характеристик, подтверждена работоспособность алгоритма путем минимизации «тестовых» функций затрат на организацию и проведение испытаний при ограничениях на среднее значение отклонения характеристики, оцениваемой при испытаниях комплекса, от предельно допустимых значений.

11. Проведена оценка эффективности разработанного метода обоснования требуемой погрешности определения характеристик измерительных комплексов путем оптимизации процедуры испытаний измерительного комплекса для измерения мощности в части оценки соответствия его дополнительной погрешности, вызванной влиянием температуры, установленным требованиям, которая показала, что применение разработанного метода позволяет на 35% сократить затраты на проведение испытаний по сравнению с существующим, при этом вероятность получения заказчиком партии ваттметров, не соответствующих требованиям тоже уменьшается и составляет величину около 0,02.

**Основное содержание диссертации отражено в печатных работах:**

1. Тарасов Д.Ю., Лаврищев А.А. Порядок отнесения технических устройств к испытательному оборудованию//Сборник трудов 32 ГНИИИ МО РФ. Выпуск 27: г. Мытищи Московской обл., 2004. - с. 146 - 153.

2. Тарасов Д.Ю. К вопросу аттестации испытательного оборудования//Материалы 5-ой Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации»: пос. Поведники Московской обл., 2004 - с. 81 - 82.

3. Тарасов Д.Ю. Анализ проведения 32 ГНИИИ МО РФ аттестации испытательного оборудования//Материалы ХХІХ научно-технической конференции молодых ученых-военных метрологов 32 ГНИИИ МО РФ, 2004 – с. 28 - 34.

4. Тарасов Д.Ю. Цели и задачи метрологической экспертизы программ и методик первичной аттестации испытательного оборудования//Тезисы докладов ХХVІІ конференции молодых ученых 32 ГНИИИ МО РФ, 2002 – с. 40 - 45.

5. Тарасов Д.Ю. Анализ состояния методического обеспечения работ по аттестации испытательного оборудования и технических средств (комплекс-

сов)//Материалы 6-ой Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации». Часть 1.: пос. Поведники Московской обл., 2006 - с. 117 - 119.

6. Тарасов Д.Ю. Анализ методического обеспечения работ по аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации//Всероссийская научно-техническая конференция. VIII Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. Часть 2. г. Москва, 2007, с. 69 - 70.

7. Тарасов Д.Ю., Шулепов Д.Ю. Анализ состояния методического обеспечения работ по аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации//Сборник трудов 32 ГНИИИ МО РФ. Выпуск 29: Мытищи Московской обл., 2006 - с. 85 - 93.

8. Тарасов Д.Ю. и др. Рекомендация МИ 32/003-04. «Разработка программ и методик аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации». Зарегистрирована 32 ГНИИИ МО РФ 01.08.2004 г.

9. Тарасов Д.Ю. и др. Рекомендация МИ 32/004-04. «Порядок проведения метрологической экспертизы программ и методик аттестации испытательного оборудования и технических систем (комплексов) полигона или испытательной организации». Зарегистрирована 32 ГНИИИ МО РФ 01.08.2004 г.

10. Тарасов Д.Ю., Мясичев Н.В. Модель динамики погрешности технических средств, применяемых при испытаниях технических средств. // Метрология № 4 2011 г. стр. 13-17.