

Московский государственный институт электроники и математики  
Национальный исследовательский университет  
Высшая школа экономики

На правах рукописи



Климантович Александр Александрович

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СРЕДСТВ  
ИЗМЕРЕНИЙ В СИСТЕМАХ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА**

Специальность 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Московском государственном институте электроники и математики Национального исследовательского университета Высшей школы экономики

**Научный руководитель:**

Доктор технических наук, профессор Карцев Евгений Александрович

**Официальные оппоненты:**

**Вышлов Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники, Кафедра системной среды качества, Заведующий кафедрой

**Лукашов Юрий Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы», Отдел научно-методических основ промышленной метрологии, Начальник отдела

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений»

Защита состоится «28» ноября 2013 г. в «12» часов на заседании диссертационного совета Д308.001.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы».

Адрес института: 119361, г. Москва, ул. Озерная, д. 46, ФГУП ВНИИМС

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП ВНИИМС.

Автореферат разослан «25» октября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук



Лысенко В.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время все больше внимания стало уделяться проблеме качества продукции и услуг. Само же понятие качества: основные аспекты качества товара или услуги – понятие, актуальное. Но из-за огромной емкости этого понятия на сегодняшний день нет единственного устоявшегося определения качества. Интересно, что практически все определения так или иначе указывают на «способность товара или услуги соответствовать».

**Качество** – совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленным и предполагаемым потребностям (международный стандарт ИСО 8402-94).

**Качество** – степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования (международный стандарт ИСО 9000:2008).

Таким образом, при определении понятия качества использовались два аспекта: аспект характеристик объекта и аспект потребностей лиц, которые используют объект, качество которого оценивается.

Роль и значение качества постоянно возрастает под влиянием развития технологий производства и потребностей человека. Подъем уровня культуры и образования с каждым днём делает потребителей всё более требовательными к качеству продукции и услуг.

С качеством продукции связаны возможности кредитования, инвестиций, предоставления льгот. В ряде стран Европы действует законы, по которым некоторые товары вообще не допускаются на рынок без сертификата качества, подтверждающего соответствие требованиям стандартов международной организации по стандартизации – ИСО.

Как известно, достижение и поддержание качества продукции на должном уровне зависит от организации систем менеджмента качества метрологического обеспечения производства. Поэтому метрологическое обеспечение систем качества рассматривают как комплекс мероприятий, направленных на достижение требуемого качества измерений. При этом в зависимости от целей, ради которых осуществляются измерения, их качество характеризуют совокупностью показателей: точностью, стоимостью. При разработке, производстве и эксплуатации продукции приходится сталкиваться именно с таким широким пониманием содержания метрологического обеспечения, поскольку качество измерений в значительной степени определяется их точностью и продолжительностью, а целесообразность и возможность использования тех или иных методов и средств измерений устанавливаются с учетом стоимости измерений и сложности их технической реализации.

Таким образом, метрологическое обеспечение систем качества основывается на двух видах деятельности в узком (традиционном) и широком смысле. В узком (традиционном) смысле метрологическое обеспечение – это

деятельность государственной и ведомственной метрологических служб по обеспечению единства и требуемой точности измерений, а в широком оно достигается совместной работой проектировщиков и технологов, метрологов и испытателей, эксплуатационщиков и ремонтников – всех, кто связан с получением и использованием измерительной информации, достижением и поддержанием требуемого качества этой информации. Следовательно, метрологическое обеспечение в широком смысле сводится к проведению самих измерений и к работам по достижению и поддержанию их качества – точности, единства, быстродействия и др.



Рис. 1. Содержание работ по метрологическому обеспечению

На рис. 1. показаны основные составляющие метрологического обеспечения предприятия. Поскольку, в процессе производства на каждой измерительной позиции осуществляется измерение одного параметра, которое может осуществляться не одним типом средства измерений (СИ), а рядом альтернативных, то одной из важнейших составляющих метрологического обеспечения является выбор СИ, обеспечивающего максимальную точность измерений при минимуме затрат на его приобретение, установку и эксплуатацию в процессе производства.

**Объектом исследования** в диссертационной работе является одна из важнейших составляющих метрологического обеспечения систем качества – рабочее средство измерений.

**Предметом исследований** в диссертационной работе является методика выбора оптимального типа средства измерений из числа альтернативных, которые можно использовать на конкретной измерительной позиции.

**Целью исследований** является разработка методики оптимизации метрологического обеспечения систем качества, позволяющая в максимальной степени исключить элемент субъективизма при **выборе рабочего средства измерений для конкретной измерительной позиции.**

**Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:**

- Разработка методических основ создания базы данных по существующим средствам измерений (на примере СИ неэлектрических величин) с учетом специфики поставленной в работе цели.
- Разработка методик формирования шкалы приоритетов метрологических, технических и эксплуатационных параметров рабочих СИ, рационального выбора для каждого из измеряемых в процессе производства параметров изготавливаемых изделий рабочего СИ.
- Обоснование принципов создания частных и интегральных критериев для численной оценки качества СИ, что позволяет сформировать базу критериев для численной оценки качества сравниваемых СИ.
- Разработка методики сравнительной оценки качества альтернативных СИ на основе частных и интегральных критериев качества СИ, а также на основе численного критерия – стоимость единицы качества СИ.
- Разработка методики минимизации количества типов СИ одного функционального назначения, применяемых в конкретных системах качества, на основе экономического критерия.

**Новые научные результаты,** полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

- Разработан алгоритм поиска альтернативных типов рабочих СИ, пригодных для использования на конкретной измерительной позиции в производственном процессе, позволяющий существенно расширить количество альтернативных СИ и повысить качество оптимизации.
- Разработана методика создания шкалы приоритетов, базирующаяся на статистической обработке информации о метрологических, эксплуатационных и технических показателях любых рабочих СИ для строгого обоснования выбора значений коэффициентов влияния.

- Разработана методика конструирования частных и интегральных критериев, с помощью которых производится количественная оценка качества рабочих СИ.
- Разработан алгоритм и методика выбора оптимального типа рабочего СИ с использованием частных и интегральных критериев качества, что позволили исключить субъективный подход к оценке качества и к выбору СИ.
- Разработаны методика, алгоритм и программное обеспечение минимизации числа типов рабочих СИ, применяемых в конкретной системе качества и предназначенных для измерения одной физической величины, в основу которой положено использование экономического критерия.

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

1. На основе проведенных исследований создана шкала приоритетов, которая позволяет установить приоритет каждого из параметров СИ, включенных в паспорт или технические условия.
2. Разработана методика создания частных и интегральных критериев качества, что дает возможность численно оценить степень приближения реальных параметров СИ к заданным.
3. Разработана методика выбора оптимального СИ из числа альтернативных, основанная на применении частных и интегральных критериев качества, что позволяет определить оптимальное СИ по интегральному и стоимостному критериям.
4. Разработана методика минимизации количества типов СИ, применяемых в процессе производства конкретной продукции, основанная на использовании экономического критерия, что позволяет получить существенный экономический эффект.
5. Впервые получены численные соотношения цена-качество, позволяющие осуществить выбор СИ по такому критерию, как критерий стоимости единицы качества без применения экспертных оценок, полученный в чистом математическом виде.

**Практическая значимость работы.**

1. Созданная методика позволяет выбрать оптимальное СИ на конкретную измерительную позицию, имеющее наивысшее качество по сравнению с альтернативными СИ.
2. Созданная методика дает возможность минимизировать экономические затраты на оснащение производственного процесса рабочими СИ.
3. Созданная методика применима к любым отраслям промышленности и любым СИ, т.е. носит универсальный характер.

4. Для всех этапов разработанной методики созданы соответствующие алгоритмы их выполнения, а также разработано соответствующее программное обеспечение.

**Реализация результатов.** Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование в организации: ООО «ПНП «СИГНУР». Результаты работы внедрены в учебный процесс специальности «Управление качеством» по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля». Выпущены соответствующие методические материалы.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 9 работ, из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы из 64 наименований. Общий объем работы 136 страниц, 6 таблиц, 35 рисунков. Приложения: справка о внедрении разработанной методики в ООО «ПНП «СИГНУР».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, проведен анализ целей, задач и содержания метрологического обеспечения процесса производства, сформулированы цели и задачи исследований.

**В первой главе** проведен анализ существующих баз данных по СИ с учетом специфики поставленной цели исследований. Описаны методические аспекты создания базы данных по СИ. Приведена структура и описание функций блоков базы данных по СИ. Разработана методика построения шкалы приоритетов параметров СИ одного функционального назначения.

Описаны методы выбора оптимального типа СИ из числа альтернативных, которые применяются в настоящее время.

**Эвристические методы** увеличивают вероятность получения работоспособного, но не всегда оптимального, решения задачи, возникшей, например, из-за неразработанности конкретной теории, неполноты или недостоверности исходных данных.

**Метод выбора по минимуму стоимости** сводится к выбору СИ исходя из сопоставления его экономических показателей с экономическими показателями других – альтернативных СИ. Данный метод позволяет выбрать оптимальное СИ с экономической точки зрения.

**Метод выбора на основании максимального количества сведений в паспорте датчика** основывается на выборе оптимального СИ исходя из количества метрологических, технических и других характеристик, помещенных в паспорте СИ. Т.е. выбор осуществляется по принципу: чем больше имеется информации о СИ, тем оно лучше по отношению к другим альтернативным СИ.

**Метод экспертных оценок** определения качества СИ основан на учете мнений специалистов-экспертов. **Эксперт** – это специалист, компетентный в решении конкретной задачи. Этот метод применяют в тех случаях, когда

показатели качества не могут быть определены другими методами из-за недостаточного количества информации, необходимости разработки специальных технических средств и т.п. Экспертный метод является совокупностью нескольких различных методов, которые представляют собой его модификации. Известные разновидности экспертного метода применяются там, где основой решения является коллективное решение компетентных людей (экспертов). Данный метод является менее выгодным с экономической точки зрения, но более корректным по сравнению с выше перечисленными.

**Составлен формат представления сведений о средствах измерений.** Проанализировав содержание 100 паспортов СИ, предназначенных для измерения конкретной физической величины (на примере датчиков давления), которые размещены в журналах, на сайтах производителей и в других источниках, была проведен статистический анализ по количеству сведений о СИ, а так же по последовательности их расположения в паспортах. После этого была составлена сводная таблица (Табл. 1), в которой указываются все параметры СИ, выраженные в числовой форме и их позиции в паспортах СИ, представленных производителями.

Таблица 1

Параметр \ № СИ	1	2	...	i	...	N-1	N
1	$X_{11}$	$X_{21}$	...	$X_{i1}$	...	$X_{(N-1)1}$	$X_{N1}$
2	$X_{12}$	$X_{22}$	...	$X_{i2}$	...	$X_{(N-1)2}$	$X_{N2}$
...							
j	$X_{1j}$	$X_{2j}$	...	$X_{ij}$	...	$X_{(N-1)j}$	$X_{Nj}$
...							
M-1	$X_{1(M-1)}$	$X_{2(M-1)}$	...	$X_{i(M-1)}$	...	$X_{(N-1)(M-1)}$	$X_{N(M-1)}$
M	$X_{1M}$	$X_{2M}$	...	$X_{iM}$	...	$X_{(N-1)M}$	$X_{NM}$

Обработка результатов, занесенных в табл. 1 проводилась по нижеприведенным формулам. Число единиц под номером 1 в строке  $j=1$  определяется выражением:

$$\sum_{i=1}^N (X_1)_{ij}, \text{ при } j=1, \quad (1)$$

где  $X_1$  – порядковый номер позиции параметра в паспорте первого СИ,  $i$  – номер СИ,  $j$  – номер параметра в таблице,  $N$  – число типов СИ,  $M$  – число параметров, содержащихся в паспортах СИ.

Соответственно по аналогии с (1):

$$\sum_{i=1}^N (X_1)_{ij}, \text{ при } j=2 \quad (2)$$

$$\dots$$

$$\sum_{i=1}^N (X_1)_{ij}, \text{ при } 2 < j < M \quad (3)$$



$$\sum_{i=1}^N (X_1)_{ij}, \text{ при } j=M \quad (4)$$

Выражение (1) определяет суммарное количество встречаемости параметра на первой позиции ( $j=1$ ) в паспортах СИ под номерами от 1 до  $N$ . Выражение (2) определяет суммарное количество встречаемости параметра на второй позиции ( $j=2$ ) в паспорте  $i$ -ого СИ. Аналогичным способом подсчитывает повторяемость параметра на других позициях в паспортах СИ, это отражается в выражениях (3) и (4). Выражение (5) является обязательным условием. Очевидно, что сумма встречаемости каждого из параметров в во всех строках табл. 1.1 должна равняться числу выборки  $N=100$ .

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (X_1)_{ij} = N \quad (5)$$

Аналогичные суммы считаются для всех параметров расположенных в паспортах СИ.

$$\sum_{i=1}^N (X_1)_j > \frac{N}{2} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (X_1)_j = N \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) являются условиями первого приоритета. Таким образом, один из параметров получает наивысший приоритет, в том случае, если соблюдаются оба эти условия.

Для построения гистограмм используем отношения:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (X_1)_{ij}}{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (X_1)_{ij}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где  $j$  в числителе принимает последовательно значения от 1 до  $M$ .



Рис. 2. Гистограмма распределения параметра «диапазон измерений» по позициям в паспортах СИ

Разработана методика определения шкалы приоритетов параметров СИ, размещаемых в базе данных, основанная на статистических методах, т. е. определение приоритетов сводится к определению частоты отображения каждого параметра на конкретной позиции в паспортах датчиков, предоставляемых производителем. В настоящее время, в связи с развитием информационных технологий и всеобщего подключения к глобальной сети Интернет, большинство производителей предоставляют информацию о СИ на своих веб-сайтах, так же информацию можно найти и в различных журналах, посвященных измерительной технике. Сама же методика заключается в следующем: делается репрезентативная выборка значительного количества типов датчиков, предназначенных для измерения одной физической величины различных производителей, как отечественных и СНГ, так и зарубежных. После чего собирается статистика по каждому параметру СИ, находящемуся в паспорте СИ. Далее подсчитывается количество повторений одного параметра в каждой позиции, в которой он встречается и строится гистограмма, на основании которой создается формат паспорта СИ в нашей Информационно-Поисковой Системе (ИПС) «Датчик». Данная форма представления информации удобна для специалистов-профессионалов в области метрологии и измерительной техники, а также для программистов, создающих ИПС.

Разработан алгоритм поиска СИ по заданным условиям, включающий в себя выполнение следующих операций:

1. Получение технических требований от главного технолога или главного инженера производства.
2. Введение технических требований в программу поиска СИ по заданным условиям. Необходимо отметить, что поиск СИ следует проводить не по всем параметрам, указанным в ТТ, т. к. в данном случае можно не получить ни одного СИ, удовлетворяющего критериям поиска. В таком случае будем использовать две основные метрологические характеристики — **диапазон измерения и погрешность измерения**.
3. После введения заданных условий производим первую итерацию поиска. Если результат поиска удовлетворителен, т.е. найдено не менее 4-х типов СИ, удовлетворяющих условиям поиска по диапазону измерения и основной приведенной погрешности, то получаем перечень из альтернативных СИ.
4. В случае неудовлетворительного результата поиска переводим, заданную технологом, основную приведенную погрешность в абсолютную.
5. Увеличиваем диапазон поиска по диапазону измерений на 25%.
6. Затем, производим вторую итерацию поиска.
7. Если полученный результат удовлетворителен, т.е. так же найдено не менее 4-х типов СИ, удовлетворяющих условиям поиска по диапазону измерения и уже по абсолютной погрешности, то получаем перечень из числа  $N \geq 4$

альтернативных СИ.

8. В случае неудовлетворительного результата поиска снова увеличиваем диапазон поиска на 50% от первоначального.
9. Проводим третью итерацию поиска.
10. Если полученный результат удовлетворителен, т.е. найдено не менее 4-х типов СИ, удовлетворяющих условиям поиска по диапазону измерения и уже по абсолютной погрешности, то получаем перечень из числа  $N \geq 4$  альтернативных СИ.
11. В случае неудовлетворительного результата поиска специалист в области метрологического обеспечения может прибегнуть к другим дополнительным источникам технических данных по СИ.

Осуществление поиска СИ в других базах производится в том случае, если количество альтернативных типов СИ меньше 4. Это связано с тем, что если число альтернативных типов меньше 4, то будет затруднительно провести корректный анализ и выбрать оптимальный тип СИ.

**Во второй главе** описаны принципы создания критериев для количественной оценки качества средств измерений.

Зачастую бывают ситуации, когда потребитель разрабатывает систему требований к средству измерения, которое он предполагает использовать для измерения (контроля) какого-либо параметра в процессе производства конкретной продукции с целью обеспечения заданного уровня ее качества.

В случае использования предлагаемого в диссертационной работе метода выбора оптимального типа средства измерения, полностью исключается элемент субъективизма, а сама задача, при создании соответствующих программных средств, должна решаться с использованием ЭВМ. В этом случае число  $n$ , конкурирующих типов датчиков можно не ограничивать. Чем больше число типов  $n$ , тем с большей вероятностью на основе строгих критериальных оценок, будет выявлен оптимальный тип средства измерения, обеспечивающий требуемое качество выпускаемой продукции.

Одним из важнейших параметров любого средства измерения является диапазон измерения, представляющий собой разность между верхним и нижним пределами измерения.

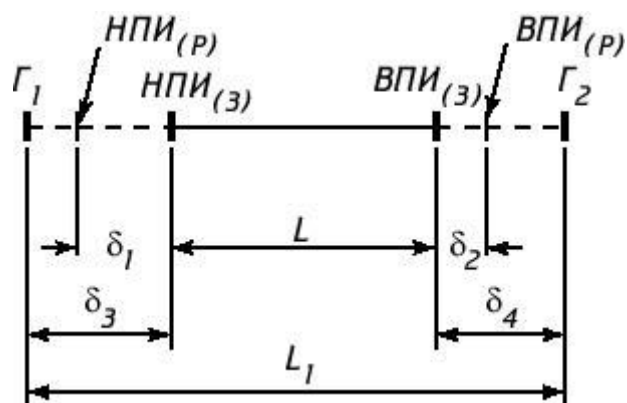


Рис. 3

На рис. 3 графически представлен диапазон измерения  $L$  любого средства измерения (СИ), представляющий собой разность между верхним и нижним пределами измерения, заданными пользователем исходя из требований к объекту контроля.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

$\text{НПИ}_{(З)}$  – заданный нижний предел измерения;

$\text{ВПИ}_{(З)}$  – заданный верхний предел измерения;

$L$  – диапазон измерения, задаваемый пользователем;

$\Gamma_1$  – нижняя допустимая граница предела измерения, которая ещё может удовлетворить пользователя;

$\Gamma_2$  – верхняя допустимая граница предела измерения, которая ещё может удовлетворить пользователя.

Положим, что потребитель намерен использовать средство измерения с диапазоном измерения

$$L = \text{ВПИ}_{(З)} - \text{НПИ}_{(З)} \quad (1)$$

и с помощью информационно-поисковой системы осуществляет поиск типов искомого СИ, удовлетворяющих этому условию. При этом может оказаться, что несмотря на большой объем типов СИ, содержащихся в базе данных, ни одно из них по диапазону измерения не будет удовлетворять условию, заданному в виде двух строгих числовых значений  $\text{НПИ}_{(З)}$  и  $\text{ВПИ}_{(З)}$ . В итоге поиска ЭВМ дает ответ, что база данных не содержит ни одного типа СИ, удовлетворяющего заданному условию. Чтобы избежать такой тупиковой ситуации, целесообразно выполнить вторую итерацию поиска, расширив диапазон измерения  $L$  до значений  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  (рис. 3). В этом случае расширенный диапазон измерения

$$L_1 = (\text{ВПИ}_{(З)} + \delta_4) - (\text{НПИ}_{(З)} + \delta_3). \quad (2)$$

Тогда программное обеспечение информационно-поисковой системы обеспечит выбор только тех типов СИ, верхний и нижний пределы которых укладываются в диапазоны

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &\leq \text{НПИ}_{(p)} \leq \text{НПИ}_{(3)} \\ \Gamma_2 &\geq \text{ВПИ}_{(p)} \geq \text{ВПИ}_{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\text{ВПИ}_{(p)}$  – верхний предел измерения одного из реальных типов средств измерения, содержащегося в базе данных;  $\text{НПИ}_{(p)}$  – нижний предел измерения одного из реальных типов средств измерения, содержащегося в базе данных.

В принципе в процессе поиска можно и не ограничивать верхнюю  $\Gamma_2$  и нижнюю  $\Gamma_1$  границы диапазона измерения, задавая только условие

$$\left. \begin{aligned} \text{НПИ}_{(p)} &\leq \text{НПИ}_{(3)} \\ \text{ВПИ}_{(p)} &\geq \text{ВПИ}_{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

но в этом случае, при заданном значении основной приведенной погрешности, результатом поиска будут все типы СИ, удовлетворяющие условию (4), что будет заведомо неприемлемо для пользователя по той причине, что большинство из выбранных типов СИ будут иметь весьма широкий диапазон измерения и, в связи с этим, большое значение абсолютной погрешности измерения, неприемлемое для пользователя.

Опыт практической работы с информационно-поисковыми системами показал, что превращение точечных значений параметров поиска в интервальные не требует увеличения интервальных значений до величин, превышающих 50% заданного диапазона измерения.

Положим, что с учетом вышеизложенного алгоритма поиска пользователь получил на выходе информационно-поисковой системы  $n$  типов СИ, каждое из которых удовлетворяет условиям поиска по диапазону измерения.

Теперь необходимо сконструировать частный критерий, с помощью которого можно было бы произвести оценку качества каждого из  $n$  типов средств измерения и выбрать оптимальный тип.

В основу создания критерия положим **степень близости реального диапазона измерения к заданному**. Для этого критерий оценки качества можно представить в виде

$$\lambda_1 = K_1 \frac{L}{L + \delta_1 + \delta_2} \quad (5)$$

где  $\lambda_1$  – частный критерий оценки качества СИ по заданному диапазону измерений,  $K_1$  – весовой коэффициент, численное значение которого зависит от

приоритета (уровня ранжировки) рассматриваемого параметра по сравнению с другими анализируемыми параметрами рассматриваемого средства измерения;  $\delta_1$  – расстояние от заданного значения нижнего предела измерения (НПИ<sub>(3)</sub>) до нижнего предела измерения рассматриваемого средства измерения (НПИ<sub>(p)</sub>);  $\delta_2$  – расстояние от заданного значения верхнего предела измерения (ВПИ<sub>(3)</sub>) до верхнего предела измерения рассматриваемого средства измерения (ВПИ<sub>(p)</sub>);  $L = \text{ВПИ}_{(3)} - \text{НПИ}_{(3)}$  – заданный пользователем (номинальный) диапазон измерения.

Из выражения (5) следует, что в случае идеального совпадения диапазона измерения рассматриваемого средства измерения с заданным пользователем  $\delta_1 = 0$ ,  $\delta_2 = 0$  и критериальная оценка  $\lambda_1 = K_1$ .

Если предположить, что для пользователя диапазон измерения при выборе СИ является приоритетом № 1, то числовое значение весового коэффициента должно быть максимальным и его величина будет зависеть от числа параметров, по которым производится выбор искомого типа СИ. Например, если таких параметров 5 и пользователь задает следующие приоритеты: диапазон измерения, абсолютная погрешность, диапазон рабочих температур, габаритные размеры и масса, то коэффициент  $K_1$  может быть принят равным 20, весовой коэффициент следующего частного критерия 16, далее 12, 8 и 4.

Выбор максимального значения и шага уменьшения весового коэффициента не имеет принципиального значения и в известной мере носит произвольный характер.

Положим, что мы приняли  $K_1 = 20$ , тогда частная критериальная оценка анализируемого СИ может находиться в диапазоне от  $\lambda_1 = 20$  ( $\delta_1 = \delta_2 = 0$ ) до  $\lambda_1 = 10$  ( $\delta_1 + \delta_2 = L$ ),  $\lambda_1 = K_1/2$ .

Рассмотрим второй пример формирования критерия оценки СИ по его массе  $m$ . В ТТ задана масса  $m_0 = 0,6$  кг. Очевидно, что во всех случаях применения СИ желательно, чтобы  $m \leq m_0$ .

В главе изложены требования к критериям качества средств измерения, требования к выбору критериальных оценок. Приведено обоснование принципов создания критериев для количественной оценки качества СИ. Проведено исследование по объективности оценки, доступности ее использования в инженерной практике.

**В третьей главе** изложена методика выбора оптимального СИ из числа альтернативных.

При выборе средства измерения из ряда альтернативных типов, когда каждый тип средства измерения имеет множество параметров, задача выбора превращается в решение сложной задачи определения оптимума на основе большого количества пересекающихся множеств. Используя различные источники информации, разработчики системы управления качеством могут найти множество типов средств измерения, позволяющих производить измерение выбранного параметра объекта с требуемой точностью. Для

оптимизации выбора средства измерения необходимо разработать методику сравнительной количественной оценки качества СИ, которая предусматривала бы рассмотрение и анализ всех параметров альтернативных средств измерения на основе объективных критериальных оценок.

Алгоритм процедуры оптимизации представлен на рис. 4.

1. На первом этапе потенциальный потребитель (технологи или конструктор) разрабатывает технические требования (ТТ) к СИ, которое он хотел бы применить для целей измерения или контроля в процессе производства какой-либо продукции на конкретной измерительной позиции.

2. На втором этапе производится поиск альтернативных типов СИ, удовлетворяющих требованиям, изложенным в ТТ. Поиск может производиться с использованием различных источников: базы данных, каталоги, информация на сайтах производителей.

3. На третьем этапе полученные метрологические, технические и эксплуатационные характеристики формируются в базу данных альтернативных типов СИ, потенциально пригодных для использования в производственном процессе на рассматриваемой измерительной позиции.

4. На четвертом этапе проводится разработка методик создания частных критериев для численной оценки степени приближения реальных значений каждого из параметров СИ к заданным в ТТ.

5. На пятом этапе излагается предложенная методика определения численных значений интегральных критериальных оценок качества каждого из альтернативных СИ.

6. На шестом этапе разрабатывается методика выбора оптимального типа СИ на основе полученных частных и интегральных критериев качества.

7. На седьмом этапе приводится методика выбора оптимального СИ из числа альтернативных с применением предложенного в диссертационной работе критерия «Стоимость единицы качества СИ».

8. На восьмом этапе проводится разработка методики минимизации количества типов СИ, применяемых на рассматриваемом производственном участке или в цехе, с использованием экономических критериев.

Реализация предложенной методики состоит из нескольких этапов.

**На первом этапе** потенциальный потребитель разрабатывает технические требования к средству измерения, которые он хотел бы применить для целей измерения или контроля в процессе производства какой-либо продукции.

Эти требования могут быть представлены в виде табл. 2, приведенной ниже, в качестве примера. Из таблицы следует, что сведения о 17 параметрах датчика усилий представлены в цифровом виде и именно эти параметры можно использовать для количественной оценки качества датчика усилий любого типа. Располагая параметрами “идеального” средства измерения, представленными в виде табл. 2, можно осуществить поиск альтернативных средств измерения. Одним из наиболее рациональных путей поиска является использование баз данных по средствам измерения различных физических величин, снабженных

программами поиска СИ по заданным условиям. При этом, для осуществления корректного поиска параметры искомого СИ должны задаваться в виде интервалов параметров, а не в виде их точечных значений, указанных в ТТ. Обычно в качестве условий поиска задают 2 – 3 параметра, стоящими первыми в ранжированном ряду параметров СИ (см. табл. 2).



Рис. 4. Разработка методики минимизации количества типов СИ

Расширение числа заданных для поиска параметров, точнее – их интервальных значений, приводит к тому, что информационно-поисковая



система не находит ни одного датчика, удовлетворяющего всем условиям поиска.

Таблица 2

Технические требования к СИ (датчику усилия)

№ п/п	Наименование параметра	Величина параметра	Размерность параметра	Весовой коэффициент К
1	Диапазон измерения	От 50 до 100	Н	40
2	Основная приведенная погрешность	0,5	%	38
3	Дополнительная температурная погрешность	0,3	%	36
4	Максимальный выходной сигнал, мА	20	мА	34
5	Максимальный выходной сигнал, мВ	1000	мВ	32
6	Чувствительность	0,4	$\frac{\text{мА}}{\text{Н}}$	30
7	Чувствительность	20	$\frac{\text{мВ}}{\text{Н}}$	28
8	Верхняя граница рабочей температуры	60	$^{\circ}\text{C}$	26
9	Нижняя граница рабочей температуры	-40	$^{\circ}\text{C}$	24
10	Относительная влажность при температуре +40 $^{\circ}\text{C}$	85	%	22
11	Максимальное значение виброперегрузок	20	$\text{м/с}^2$	20
12	Длина датчика	120	мм	18
13	Ширина датчика	50	мм	16
14	Высота датчика	40	мм	14
15	Диаметр датчика	25	мм	12
16	Масса датчика	0,6	кг	10

17	Наработка на отказ	5000	ч	8
----	--------------------	------	---	---

**Вторым этапом**, реализующим предложенную методику, является разработка методик создания критериев для численной оценки степени приближения реальных параметров каждого из альтернативных типов средств измерения к параметрам, указанным в ТТ.

Если бы в табл. 2 на наивысшее значение весового коэффициента имел другой параметр, а диапазон измерения после перераспределения весовых коэффициентов влияния оказался бы на третьей позиции, то в этом случае  $K_3=26$  (см. табл. 1) и  $\lambda_1 = 26$ .

В особых случаях ранжировку параметров может осуществлять потребитель (пользователь СИ) и если, например, датчик усилий предназначен для работы на летающем объекте (ракета), то, возможно, что на первое место по приоритету потребитель поставит массу датчика, а на последующие – его габаритные размеры. Соответственно весовой коэффициент у критерия оценки качества датчика по массе будет максимальным, т. е.  $K_{16} = 40$ .

Т. о. вопрос распределения весовых коэффициентов в табл. 2 в этих особых случаях находится в компетенции потребителя (пользователя).

В случае использования искомого СИ в качестве СИ общепромышленного применения, ранжирование параметров производится в соответствии со шкалой приоритетов, методика создания которой описана в гл. 1.

При выпуске СИ общепромышленного применения в технических паспортах на средство измерения ранжирование параметров по степени их практической важности осуществляет изготовитель СИ и в большинстве случаев ранжировка соответствует приведенной в табл. 2.

Поскольку при транспортировке, установке СИ на рабочее место меньшая масса предпочтительна. Особое значение величина массы имеет при установке СИ на летающий объект.

Если в условия поиска включить все параметры, указанные в табл. 2, то с высокой степенью вероятности, близкой к единице, можно утверждать, что даже при больших объемах баз данных не найдется ни одного СИ, которое в точности удовлетворяло бы требованиям ТТ по всем 16 параметрам.

В связи с этим в условия поиска приходится вводить не все параметры, заданные в ТТ, а только наиболее существенные, например – диапазон измерения и основная приведенная погрешность. При этом в некоторых типах СИ, найденных в процессе поиска, некоторые из параметров могут отличаться от заданных в ТТ как в меньшую, так и в большую сторону.

В этом случае частный критерий, учитывающий это обстоятельство, будет иметь вид

$$\lambda_m = \frac{m}{m_0} * K_{16}$$

Действительно, при  $m = m_0$   $\lambda_m = 1 \cdot K_{16}$ ;

при  $m > m_0$  ,  $\lambda_{m<} = \left(\frac{m_0}{m}\right) \cdot K_{16} > 1 \cdot K_{16}$

при  $m \leq m_0$  ,  $\lambda_{m>} = \left(\frac{m_0}{m}\right) \cdot K_{16} < 1 \cdot K_{16}$

Предложенный частный критерий позволяет количественно оценить качество датчика с точки зрения близости массы рассматриваемого реального датчика к массе, указанной в ТТ. Численное значение критерия будет тем больше, чем меньше масса анализируемого СИ.

Такой же вид имеют частные критерии для оценки качества датчика по габаритным размерам (длина, ширина, высота, диаметр).

### Этап 3. Определение интегрального критерия качества СИ.

Метод оценки качества средства измерения базируется на определении интегральной критериальной оценки, представляющей собой сумму частных критериальных оценок по каждому из параметров, входящих в технические требования на средство измерения, и имеющих численное выражение. Эта интегральная критериальная оценка имеет вид

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i,$$

где  $\lambda_i$  - частная критериальная оценка качества СИ по  $i$ -му параметру, общее число которых равно  $N$ .

Оптимальным из числа конкурирующих будет являться то средство измерения у которого величина  $\lambda_{\Sigma}$  будет иметь максимальное значение.

В том случае, если известны стоимость каждого из анализируемых средств измерения, целесообразно использовать более емкий интегральный критерий качества, который условно можно назвать “стоимость единицы качества”. Обозначим его через  $C_T$ . Для каждого из  $N$  альтернативных средств измерения определяется стоимостной критерий  $C_T$  с использованием выражений

$$C_{T1} = \frac{C_1}{\lambda_{\Sigma 1}}, \dots, C_{Ti} = \frac{C_i}{\lambda_{\Sigma i}}, \dots, C_{TN} = \frac{C_N}{\lambda_{\Sigma N}},$$

где  $C_1, \dots, C_i, \dots, C_N$  - стоимость каждого из СИ, которые вошли в число анализируемых (конкурирующих);

$\lambda_{\Sigma 1}, \dots, \lambda_{\Sigma i}, \dots, \lambda_{\Sigma N}$  - интегральные критериальные оценки каждого из  $N$  средств измерения.

Очевидно, что с позиции “стоимость – качество” оптимальным из числа  $N$  будет то средство измерения, которое имеет минимальное значение критерия  $C_T$ .

В результате разработана методика выбора оптимального СИ с использованием частных и интегральных критериев. Разработаны алгоритмы вычисления частных и интегральных критериев и на их основе были созданы соответствующие программы. Продемонстрировано в действии программное обеспечение, позволяющее реализовать предложенную в диссертационной работе методику. Проведено моделирование процессов оптимизации применительно к конкретной выборке. Выборки были получены из «ИПС «Датчик», которые проводились по заданным потенциальным заказчиком параметрам. Было проведено моделирование процесса выбора оптимального типа СИ с варьированием весовых коэффициентов (изменением рейтинга параметров СИ).

**В четвертой главе** приведена предложенная автором работы методика минимизации числа типов СИ, применяемых в масштабе производственного участка или цеха, с использованием экономического критерия. Экономическую оценку качества средства измерения следует рассчитывать, исходя из оценки составляющих экономического показателя качества СИ. Экономический критерий качества средства измерения – сумма всех входящих в стоимость экономических показателей, выраженных в числовой форме. В структуру экономического показателя входят: стоимости средства измерения, монтажа/демонтажа (ввод в эксплуатацию), поверки/калибровки, транспортировки, хранения, технического обслуживания, резерва (стоимость запасного средства измерения).

Экономический показатель одного СИ рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{T11} = C_{Д1} + C_{МД1} + C_{ТО1} + C_{П1} + C_{Р1},$$

где  $C_{T11}$  – суммарная (эксплуатационная) стоимость первого СИ,  $C_{Д1}$  – стоимость первого СИ,  $C_{МД1}$  – стоимость монтажа/демонтажа первого СИ,  $C_{ТО1}$  – стоимость технического обслуживания первого СИ,  $C_{П1}$  – стоимость поверки первого СИ,  $C_{Р1}$  – стоимость резерва, которая в свою очередь равна  $C_{Д1}$ , т.е. стоимости самого СИ.

Соответственно, для остальных  $N-1$  рабочих позиций стоимость затрат определяется аналогичными выражениями.

$$C_{T12} = C_{Д2} + C_{МД2} + C_{ТО2} + C_{П2} + C_{Р2},$$

...

$$C_{T1i} = C_{Ди} + C_{МДи} + C_{ТОi} + C_{Пи} + C_{Рi},$$

...

$$C_{T1N} = C_{ДN} + C_{МДN} + C_{TON} + C_{ПN} + C_{РН},$$

Суммарная стоимость по обеспечению отдельного участка производственного процесса рабочими СИ одной физической величины. Определяется как сумма затрат на эксплуатацию всех  $N$  СИ за определенный временной интервал (например, за 1 календарный год) выражением (7).

Выражение (7) условимся называть групповым экономическим критерием для всех СИ первой из рассматриваемых физических величин (например, давления).

$$C_{T\Sigma 1} = \sum_{i=1}^N C_{T1i} \quad (7)$$

Поскольку во время производственного процесса проводятся измерения не одной физической величины, то необходимо проводить расчет стоимости затрат на измерения и других физических величин.

Формула расчета затрат на измерения второй физической величины проводится аналогичным образом:

В конечном результате суммарные затраты на использование рабочих СИ на рассматриваемом производственном участке можно рассчитать по формуле:

$$C_{T\Sigma} = \sum_{j=1}^M C_{T\Sigma j} = C_{T\Sigma 1} + C_{T\Sigma 2} + \dots + C_{T\Sigma (M-1)} + C_{T\Sigma M}$$

Величина  $C_{T\Sigma}$  является суммарным показателем затрат на измерения всех физических величин в процессе производства.

Изложена методика минимизации числа типов СИ, основанная на принципе поглощения и оценки полученного при этом экономического эффекта. Методика минимизации числа типов СИ основана на принципе поглощения. Принцип поглощения позволяет «поглотить» один тип СИ другим, при соблюдении следующих условий:

1. Абсолютная погрешность поглощающего датчика не должна превышать абсолютную погрешность поглощаемого.
2. Диапазон измерений поглощаемого датчика должен быть не больше и содержаться внутри диапазона измерений поглощающего датчика.

При выполнении поглощения надо учитывать, что абсолютная погрешность рассчитывается исходя из диапазона измерения и основной приведенной погрешности.

Разработан алгоритм минимизации числа типов СИ.

На Рис. 5 представлен алгоритм минимизации числа типов средств измерения, применительно к одному участку производственного процесса. Первоначально определяется исходный набор типов средств измерения, и их метрологические и экономические показатели. Затем производится минимизация числа типов средств измерения. После чего, вновь полученное число типов СИ сравнивается с числом типов в исходном наборе. В случае, если число типов в оптимизированном наборе не уменьшилось, то исходный набор можно считать оптимальным для конкретного участка производственного процесса, а так же его экономический показатель будет являться оптимальным.

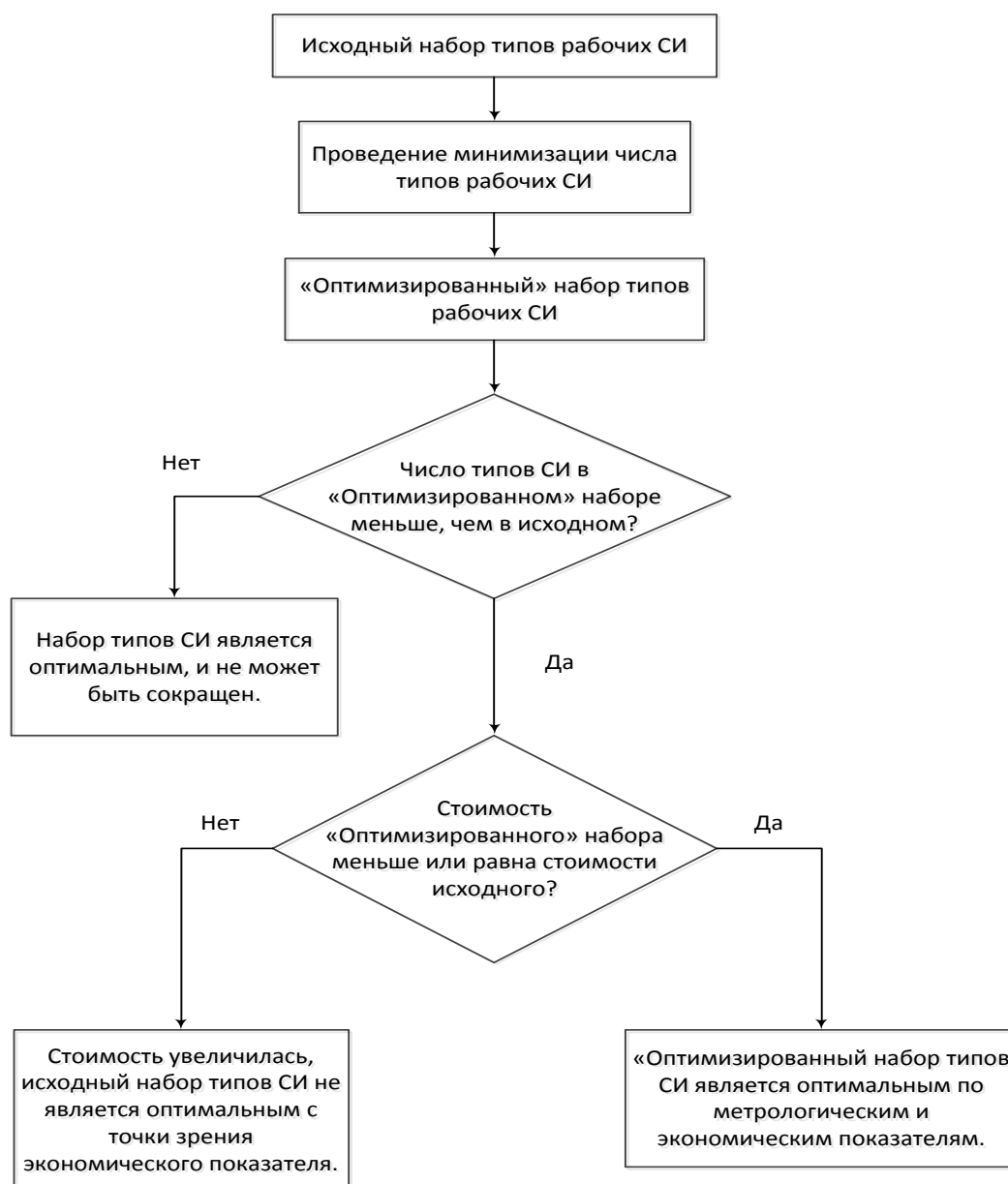


Рис. 5. Алгоритм минимизации числа типов СИ

Если число типов в оптимизированном наборе типов СИ уменьшилось по сравнению с исходным набором, то проводится сравнение экономического показателя оптимизированного и исходного наборов. Если экономический показатель оптимизированного набора типов СИ больше, чем у исходного набора, то с точки зрения экономического эффекта полученный набор типов СИ не является оптимальным. Если же экономический показатель оптимизированного набора типов СИ остался равным экономическому показателю исходного набора типов, то такой набор типов СИ считается оптимальным с метрологической точки зрения. В том случае, когда в оптимизированном наборе уменьшилось и число типов СИ, и значение экономического показателя, по сравнению с теми же данными исходного набора, то такой набор будет считаться оптимальным с метрологической и экономической точки зрения. Что позволит сократить не только экономические

затраты (приобретение, монтаж, калибровку, техническое обслуживание), а также позволит сократить временные затраты на закупку, калибровку, установку и пуско-наладочные работы за счет одного поставщика, однообразия самого СИ, что влечет за собой сокращение времени изучения, поверки и ремонта данного СИ рабочими предприятия.

Проведено моделирование с целью апробации предложенной методики. Апробация показала, что как бы не изменялись экономические показатели при одинаковом наборе типов СИ, результат минимизации числа типов СИ будет одинаковым.

В результате разработана методика минимизации количества типов СИ, основанная на принципе поглощения, предложен алгоритм реализующий данную методику. Также предложена программа «Оптимизация», реализующая предлагаемую методику, и позволяющая наглядно убедиться в оптимизации количества применяемых типов СИ на отдельно взятом участке производственного процесса.

**В заключении** приводятся выводы и основные результаты работы.

1. Разработанный комплекс методик позволяет оптимизировать состав СИ в системах менеджмента качества, т.е. достигнуть поставленную в диссертационной работе цель.

2. Разработанная методика является оригинальной и позволяет оптимизировать состав рабочих СИ, входящих в метрологическое обеспечение систем качества на основе количественных критериев качества. Такой подход является новым и обеспечивает объективность выбора СИ.

3. Впервые получены численные соотношения цена-качество, позволяющие осуществить выбор по такому критерию, как критерий стоимости единицы качества без применения экспертных оценок, полученный в чистом математическом виде.

4. Разработана методика построения шкалы приоритетов параметров СИ, предназначенных для измерения любой физической величины, позволяющая определить приоритеты каждого из параметров СИ, помещенных в его паспорт или технические условия.

5. Разработана методика создания частных и интегральных критериев, с помощью которых производится количественная оценка качества альтернативных СИ.

6. Разработаны методики и алгоритмы выбора оптимального СИ с использованием частных и интегральных критериев качества.

7. Разработана методика, в основу которой положено использование экономического критерия, и разработан алгоритм минимизации количества применяемых типов СИ, предназначенных для измерения одной физической величины.

8. На основе разработанных алгоритмов было создано и апробировано соответствующее программное обеспечение.

9. Созданные методики позволяют выбрать оптимальное СИ на конкретную измерительную позицию, имеющее наивысшее качество по сравнению с альтернативными СИ. Использование данных методик дает возможность минимизировать экономические затраты на оснащение производственного процесса СИ, потому как при их использовании не требуется использовать метод экспертных оценок, что в свою очередь также сокращает время на поиск и определение оптимального типа СИ на конкретную измерительную позицию. Так же основным преимуществом применения описанных методик является возможность в максимальной степени исключить элемент субъективизма при выборе оптимального СИ.

10. Результаты работы были использованы на предприятии ООО «ПНП «СИГНУР», о чем имеется справка о внедрении результатов диссертационной работы.

11. По результатам работы были разработаны методические указания по проведению лабораторных работ по курсу «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» и апробированы в учебном процессе.

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

1. Климантович А.А. Методика количественной оценки качества средств измерений одного функционального назначения // Качество. Инновации. Образование. Москва. – 2012. - №8. – С. 52-53, 0,25 п.л.
2. Климантович А.А. Методика выбора средства измерения из числа альтернативных на основе количественных критериев качества // Качество. Инновации. Образование. Москва – 2012. - № 9. – С. 72-75, 0,5 п.л.
3. Климантович А.А. Разработка методики количественной оценки качества датчиков одного функционального назначения, с целью минимизации количества применяемых типов // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Москва – 2009.
4. Климантович А.А. База данных «Датчики измерения неэлектрических величин» со встроенным в нее электронным справочником // Сборник статей Всероссийская конференция научно-технической школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». Сочи – 2009. -№ 20. – С. 103-107, 0,25 п.л.
5. Климантович А.А. Количественная оценка качества средств измерения с использованием ПК // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Москва – 2010.
6. Климантович А.А. Методика количественной оценки качества средств измерений одного функционального назначения // Сборник статей



Всероссийская конференция научно-технической школы-семинара «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах». Сочи – 2010. – № 21. – С. 109-112, 0,25 п.л.

7. Климантович А.А. Оптимизация количества применяемых типов датчиков одного функционального назначения, с использованием экономических показателей // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Москва – 2011.
8. Климантович А.А. Методика оценки качества альтернативных средств измерений» // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. Москва – 2012.
9. Карцев Е.А., Климантович А.А., Юрин А.И. Методика выбора оптимального средства измерений из числа альтернативных // Статья в журнале Датчики и Системы. Москва – 2013. - № 5. – С. 24-29, 1 п.л.