

# Информационные технологии

УДК 681.3

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ИНТЕРНЕТ-РЕКЛАМЫ НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ

*Д.А. Ёлкин<sup>1</sup>, И.А. Минаков<sup>2</sup>, С.И. Вольман<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ООО НПК «Максифаер Девелопмент»  
Россия, 443125, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 349, 3-й этаж

<sup>2</sup> Институт проблем управления сложными системами РАН  
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

E-mail: dmitry.yolkin@maxifier.com

*Рассматривается одна из последних тенденций в области предложения рекламного контента – расширенные возможности использования ключевых слов для целевого показа рекламных объявлений пользователям интернет-порталов. Описываются различные способы использования ключевых слов и сочетаний, преимущества, обеспечиваемые использованием данного подхода, механизм и логика доставки, возможности оптимизации по ключевым словам, примеры из практики и достигнутые результаты. В рамках исследования, запущенного с целью выявления потенциального прироста CTR кампаний в результате применения оптимизации по ключевым словам, было выявлено, что в среднем ожидаемый прирост варьируется от 10 до 20 %. Это в совокупности с другими методами оптимизации может существенно увеличить эффективность хода рекламных кампаний.*

**Ключевые слова:** интернет-реклама, рекламная кампания, ключевые слова, оптимизация по ключевым словам, оптимизация медийной рекламы, пара ключ/значение.

В настоящее время в области оптимизации интернет-рекламы наблюдаются новые тенденции, не проявлявшиеся еще несколько лет назад. Среди таких трендов можно отметить стремление рекламодателей оценивать эффективность рекламных кампаний [1] не по количеству доставленных показов или кликов, а по эффективности действий, которые конечный пользователь совершил с каждой конкретной кампанией, например уровню интерактивного взаимодействия с рекламным баннером или регистрации на сайте рекламодателя, не говоря уже о приобретении товара или услуги.

Кроме того, все чаще и чаще в последнее время рекламодатели стремятся показать рекламу не просто на конкретной странице, в конкретной стране или городе, и именно конкретному пользователю или хотя бы целевой аудитории – т. е. тем, кто, по предварительной оценке, должен быть наиболее восприимчив к конкретной рекламе. Например, если мы говорим о рекламе автомобилей, то данную

---

*Дмитрий Александрович Ёлкин, руководитель департамента оптимизации и управления.*

*Игорь Александрович Минаков (д.т.н.), старший научный сотрудник лаборатории анализа и моделирования сложных систем.*

*Семен Игоревич Вольман, технический директор.*

рекламу целесообразно показывать пользователям, которые, к примеру, посещали сайт автомобильных новостей больше чем несколько раз за последнюю неделю.

С технической точки зрения для реализации этого стремления используются ключевые слова. Рекламодатели и медийные агентства конструируют сложные семантические конструкции путем формирования булевого выражения, описывающего на основе ключевых слов целевую аудиторию, что дает им большую гибкость при управлении своими рекламными кампаниями. Какие преимущества предоставляет использование ключевых слов?

1. С помощью ключевых слов пользователю может показываться в первую очередь та реклама, которая наиболее точно соответствует запросу, введенному им в поисковую систему (google, yandex и т. д.), и, тем самым, которая наиболее релевантна текущим потребностям пользователя;

2. С помощью ключевых слов и выражений, заданных для рекламных кампаний, можно установить семантическое соответствие со страницами, семантическими дескрипторами или иными способами описания семантики страниц, на которых может быть показана данная кампания. Семантические дескрипторы могут строиться автоматически в фоновом режиме с помощью специальных утилит и приложений. В простейшем же случае веб-мастер при верстке каждой страницы может вставлять в запрос на получение рекламы от рекламного сервера некоторый семантический дескриптор (например перечень ключевых слов, описывающих семантику страницы), на основе которого и возвращаются кампании, наиболее релевантные данной странице;

3. Можно более гибко управлять собственным инвентарем (т. е. перечнем сайтов, страниц, которые доступны пользователю и на которых может быть показана реклама). Так, например, если на некотором сайте все страницы динамические и каждая новая статья имеет свой уникальный адрес в интернете в пределах данного сайта, то гораздо проще не вносить каждую статью в общий регистр доступных страниц, а просто разметить ее необходимыми ключевыми словами, описывающими содержание статьи, и уже привязывать рекламу к странице на основе этих ключевых слов.

Так как использование ключевых слов – мощный инструмент, который относительно недавно стал активно применяться, на текущий момент задача оптимизации по ключевым словам приобретает всю большую и большую актуальность.

### **Примеры ключевых слов и выражений**

Прежде чем приступить к описанию конкретных примеров ключевых слов, следует отметить, что общий термин «ключевые слова» можно разделить на несколько категорий.

1. Непосредственно *ключевые слова*, которые представляют собой отдельные слова или фразы, написанные на понятном человеку языке и наделенные некоторым семантическим смыслом. Как правило, когда рекламная кампания описывается с помощью ключевых слов, то оператор может указать, что именно он хочет – чтобы все или хотя бы одно из указанных ключевых слов или фраз присутствовало /отсутствовало на странице, на которой должна быть показана реклама.

В качестве примеров можно привести следующие выражения:

– *makeup, eye+makeup, eyeshadow, eye+shadow, lip+gloss, mascara* – данный набор ключевых слов объединен через логическое ИЛИ и значит, что

кампания может быть показана на странице, если хотя бы одно из этих слов/фраз встретится на этой странице;

- *bmw, audi, !porsche, !opel* – данный набор ключевых слов означает, что реклама будет показана на страницах, которые описывают такие марки, как BMW и Audi, но не будет показана на страницах, посвященных описанию Porsche и Opel.

Заметим, что синтаксис, в котором представляются конкретные ключевые слова и выражения, зависит от выбранного рекламного сервера, который и занимается физической доставкой рекламы на страницы для отображения ее конкретному пользователю.

2. *Пара «ключ – значение» и булевы выражения*, составленные из различных ключей и их значений. Основное отличие от ключевых слов заключается в том, что в данном случае у нас один какой-то ключ может принимать множество всевозможных значений. В качестве примеров можно привести следующие выражения:

–  $((CAR\_MAKE=nissan) AND (CAR\_LOC~lo))$  – данное выражение обозначает, что рекламная кампания может быть показана только на страницах, имеющих отношение к автомобилям марки Nissan, которые продаются/сдаются в аренду в городах, содержащих в своем названии символы lo, например London. Стоит отметить, что это реальное ключевое выражение, взятое от кампании, рекламирующей сдачу автомобилей в аренду;

–  $((((CAR\_MAKE=hyundai)AND((CAR\_AGE=1)OR(CAR\_AGE=2)OR(CAR\_AGE=3)OR(CAR\_AGE=4)OR(CAR\_AGE=5)OR(CAR\_MIN=5000)OR(CAR\_MIN=6000)OR(CAR\_MIN=7000)OR(CAR\_MIN=8000)OR(CAR\_MIN=9000)OR(CAR\_MIN=10000)OR(CAR\_MIN=11000)OR(CAR\_MIN=12000)OR(CAR\_MIN=13000))))))$ . Не все ключевые выражения тривиальны и легко понимаются пользователем, существуют выражения и такого вида. В данном выражении используется уже больше ключей и их значений, и при показе рекламы пользователю принимается во внимание не только марка автомобиля, но и его возраст и минимальная стоимость. Зачастую для того, чтобы пользователю было более понятен смысл данных выражений, они требуют упрощения за счет выполнения над ними правил булевой алгебры.

Физический механизм сопоставления рекламной кампании, описанной с помощью ключевых слов и выражений, со страницей, на которой может быть показана реклама, происходит следующим образом (см. рисунок):

1) когда пользователь заходит на какую-то страницу, то загружается содержимое этой страницы, в том числе рекламному серверу посылаются запросы на получение рекламных баннеров;

2) в момент формирования запроса к рекламному серверу определяется список ключевых слов или пар «ключ – значение», которые описывают семантическое содержимое данной страницы, и уже этот список вставляется в запрос к рекламному серверу. Что именно посылать рекламному серверу – отдельные ключевые слова или пары «ключ – значение», зависит от того, как именно они ищутся на странице:

- если в качестве ключевых слов используется содержимое cookie пользователя, то целесообразнее посылать ключевое выражение, составленное из пар «ключ – значение»;
- если список ключевых слов определяется с помощью частотного анализа вхождения тех или иных слов на странице (например этим занимается

компания Grapeshot), то проще сформировать ключевое выражение, состоящее из отдельных слов;

3) после того как запрос отправлен рекламному серверу, он определяет, какому именно ключевому выражению, которое используется для описания рекламной кампании, больше соответствует этот запрос. И уже на основе этой информации выбранный рекламный баннер отдается на страницу пользователя.

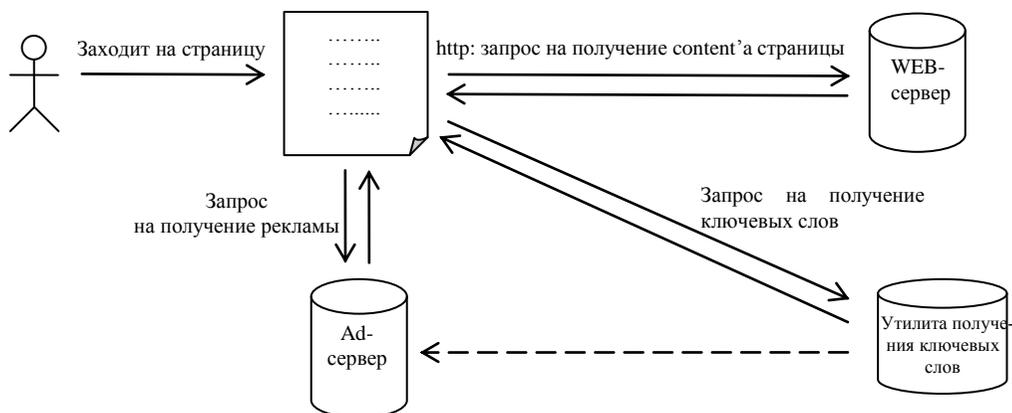


Диаграмма процесса отображения пользователю html-страницы, содержащей рекламу с ключевыми словами

### Основные шаги оптимизации по ключевым словам

Оптимизацию по ключевым словам можно разделить на несколько этапов.

1. Преобразование исходного булевого выражения, составленного с помощью ключевых слов и связанного с некоторой рекламной кампанией, к некоторому выбранному базису, в котором может работать система. Приведение исходного выражения к выбранному базису необходимо, потому что разные клиенты могут составлять исходные булевы ключевые выражения разной степени сложности и оптимальности. Преобразование к выбранному базису позволит иметь внутри системы ключевое выражение в одном постоянном формате, что облегчит работу и понимание данного выражения в дальнейшем.

2. Получение статистической информации по каждому ключевому слову, по значению каждого отдельного интересующего ключа либо их совокупности.

3. Вывод на основе имеющейся статистической информации о том, как именно будет происходить оптимизация и какие подходы будут использоваться [2]:

- отдельно по каждому ключу и его значениям (например рассматриваем только все значения ключа  $key_1$  независимо от статистики, набранной другими ключами и значениями);
- не выделяя отдельный ключ либо семантическую категорию и оптимизируя по всем ключам и значениям сразу (например, за раз можно исключить от кампании наименее эффективные значения ключей  $key_1, key_2, \dots, key_n$ );
- рассматривая и удаляя не отдельные значения отдельных ключей, а наименее эффективную комбинацию тех или иных значений. Например, если значения  $key_1=value_1$  и  $key_2=value_2$  часто используются сов-

местно, т. е. по ним обоим есть одинаковая статистика, и при этом эта комбинация значений наихудшая среди прочих аналогичных комбинаций, то предлагать исключать за раз не отдельную пару  $key_1=value_1$  или  $key_2=value_2$ , а всю комбинацию  $key_1=value_1$  и  $key_2=value_2$  целиком.

4. Получение на основе статистической информации и выбранного оптимизационного подхода нового булевого выражения, которое по сравнению с первоначальным выражением будет содержать меньше неэффективных элементов, либо не будет содержать их вообще, либо, наоборот, будет содержать новые, более эффективные с точки зрения выбранного оптимизационного подхода ключевые слова и их значения.

### **Выбор и построение ключевого базиса**

В зависимости от задач и потребностей могут использоваться различные базисы и алгоритмы приведения к ним. В рамках тех задач, которые нам пришлось решать, использовался следующий подход для построения базиса.

1. По исходному ключевому выражению первоначально определяется совокупность базовых форм, где базовая форма представляет собой ключ, значение и операцию между ними.

2. Формируется нормированное выражение, которое представляет собой дизъюнктивную нормальную форму исходного выражения (дизъюнкцию конъюнкций базовых выражений).

3. Строится «осевая» форма выражения – представление нормированного выражения в виде конъюнкций, причем аргумент любой конъюнкции зависит только от одного ключа. Именно с этой осевой формой, если она могла быть построена, осуществлялась дальнейшая работа с точки зрения оптимизации. Алгоритм построения «осевой» формы на основе нормальной формы следующий.

Берем все ключи и для каждого выполняем следующие шаги:

- для каждой конъюнкции базовых выражений исключаем выбранный ключ, получаем набор выражений без заданного ключа;
- если все полученные выражения эквивалентны, то выносим все исключенные базовые выражения в отдельный операнд нового конъюнктивного выражения и выполняем предыдущий шаг для другого ключа, иначе считаем выражение неприводимым к осевой форме.

Для того чтобы описанный алгоритм стал более понятен и очевиден, приведем пример. Допустим, у нас есть исходное ключевое выражение вида

*car=bmw and type=sedan, car=bmw and type=hatchback, car=bmw and type=cuf, car=bmw and type=offroad, car=bmw and type=cabriolet, car=bmw and type=moto, car=bmw and type=premium.*

В данном случае исходное выражение представляет собой нормированное выражение (дизъюнкцию конъюнкций). По нормированному выражению строим «осевую» форму, используя алгоритм, описанный выше. Для данного выражения она будет равна

*car=bmw and type in (sedan, hatchback, cuf, offroad, cabriolet, moto, premium).*

Именно с этой «осевой» формой будет осуществляться дальнейшая работа. Приведение к «осевой» форме осуществляется по нескольким причинам:

- она проще для понимания конечным пользователем;
- если мы говорим об оптимизации, то основные приемы, используемые в оптимизации для улучшения CTR или доставки кампании, – это удаление неэффективных или добавление более эффективных ключей и их

значений. Но прежде чем что-то удалить из выражения, необходимо убедиться, что кампания идет на данном элементе и что удалить желаемый элемент из исходного булевого выражения в принципе возможно. Аналогичная проверка характерна и для добавления элементов. А сделать проверки, описанные выше, на основе «осевой» формы гораздо проще, чем на основе исходного выражения.

### **Методы и результаты оптимизации по ключевым словам**

В качестве методов оптимизации по ключевым словам могут использоваться статистические методы оптимизации, применяемые для оптимизации и других параметров рекламной кампании (например страниц, часов, дней недели, браузеров, операционных систем, ГЕО-информации и т. д.). Более детально данные методы описаны в статьях [3, 4]. Если говорить кратко, то для оптимизации по CTR используются статистические методы, работающие на основе исторической статистики за последние 2-3 недели и предлагающие удалить наименее эффективные ключи и их значения, т. е. элементы, на которые приходится достаточное количество показов, но реакция пользователей в виде кликов невелика. Стратегия поиска неэффективных элементов определяется конкретным выбранным оптимизационным алгоритмом.

Если мы говорим об улучшении доставки кампании, то в первую очередь наша задача – расширить таргетинг по ключам, т. е. сделать так, чтобы наша рекламная кампания показывалась на максимально возможном количестве ключей и их значений. Чтобы сделать это, в первую очередь надо добавить те значения ключей, на которых кампания еще не идет и которые семантически совместимы с данной рекламой. Во-вторых, если в ключевом выражении есть ограничения, чтобы кампания не шла на каких-то ключах, надо постараться убрать эти ограничения, если это не противоречит контракту с рекламодателем.

Основное отличие ключевых слов от других параметров рекламной кампании заключается в том, что ключевые слова могут быть наделены семантическим смыслом. Т. е. даже не имея никакой статистической информации по ключевым словам и значениям, потенциально, используя методы контекстной оптимизации [2], можно показывать пользователю релевантную рекламу и увеличивать показатели эффективности этой рекламы, такие как доставка и CTR. Авторами статьи ранее были разработаны методы контекстной оптимизации по ключевым словам, суть которых заключалась в том, что для каждой страницы, на которой уже идет или потенциально может идти рекламная кампания, мы должны получить дескриптор, описывающий семантику данной страницы:

- данный дескриптор в простейшем случае может представлять собой набор ключевых слов, наиболее часто встречающихся на данной странице (за исключением всевозможных стоп-слов и слов, не несущих семантической нагрузки);
- в более сложном варианте для каждой страницы строится семантический дескриптор, который представляет собой некоторую онтологическую сеть, с помощью методов морфологического, синтаксического и семантического анализа [5]. По сравнению с методами частотного анализа данный подход позволяет не просто определить наиболее часто встречающиеся слова и фразы, но и выстроить семантические отношения между ними. Это позволяет осуществлять сравнение таких семантических дескрипторов между собой гораздо эффективнее.

Построенный семантический дескриптор может быть использован несколькими способами.

1. Если семантический дескриптор представляет собой набор наиболее часто встречающихся ключевых слов на странице, на которой может идти рекламная кампания, то необходимо добавить эти ключевые слова в параметры таргетинга данной рекламной кампании. Т. е. кроме того, что кампания будет непосредственно запланирована на конкретные страницы, она будет запланирована и на ключевые слова. Это позволит показывать данную рекламу более эффективно. Когда пользователь в некотором поисковике введет ключевые слова, на основе которых ему будет показана одна из страниц, где идет наша реклама, то именно наша рекламная кампания будет показана в первую очередь по сравнению с другими рекламными кампаниями, также запланированными на данную страницу, но не имеющими ключевых слов в параметрах таргетинга. Это происходит потому, что у большинства рекламных серверов рекламные кампании с таргетингом по ключевым словам имеют более высокий приоритет доставки по сравнению с кампаниями, не имеющими ключевого таргетинга. И в результате данного подхода мы сможем улучшить доставку и эффективность нашей кампании.

2. Когда семантический дескриптор представляет собой онтологическую сеть, то:

- необходимо построить аналогичные семантические дескрипторы для всех страниц, на которых в настоящий момент не идет выбранная рекламная кампания;
- необходимо для данной рекламной кампании на основе описания, предоставляемого для данной рекламы в виде понятного человеку текста, построить аналогичный семантический дескриптор в виде онтологической сети;
- после того как дескрипторы для кампании и для всех страниц построены, необходимо произвести сравнение – какие именно семантические дескрипторы страниц наиболее близки дескриптору рекламной кампании, на основе результатов сравнения выбрать наиболее подходящие страницы и запланировать на них рекламную кампанию.

#### **Сравнение эффективности различных оптимизационных подходов**

<b>Метод оптимизации</b>	<b>Прирост по доставке, %</b>	<b>Прирост по CTR, %</b>
Статистическая оптимизация по страницам	5–7	5–10
Статистическая оптимизация по страницам + эвристические методы (Frequency Capping, распределение в течение дня)	7–10	10–13
Оптимизация по страницам + оптимизация по ГЕО-информации, браузеру, операционной системе	10–13	13–18
Оптимизация по страницам + ГЕО (включая браузеры, ОС) + статистическая оптимизация по ключевым словам	13–18	18–23
Оптимизация по страницам + ГЕО (включая браузеры, ОС) + статистическая и контекстная оптимизация по ключевым словам	18–22	23–28

В рамках ООО НПК «Максифаер Девелопмент» был разработан собственный программный продукт, который представляет собой систему поддержки принятия решений, направленную на оптимизацию рекламных кампаний по ключевым словам.

В рамках исследования, запущенного с целью выявления потенциального прироста CTR кампаний в результате применения оптимизации по ключевым словам, было выявлено, что в среднем ожидаемый прирост варьируется от 10 до 20 %. Это в совокупности с другими методами оптимизации может существенно увеличить эффективность хода рекламных кампаний. Детальное сравнение приведено в таблице. Данное исследование проводилось на выборке, состоящей из 30 рекламных кампаний, каждая из которых наблюдалась в течение месяца. Каждая рекламная кампания была разделена на 5 подкампаний, имевших изначально одинаковые параметры таргетинга. Далее к первой группе кампаний применялись только методы статистической оптимизации по страницам, ко второй – методы статистической оптимизации по страницам и эвристические методы. Аналогично к третьей, четвертой и пятой группам применялись соответствующие методы, приведенные в таблице. Анализ показывает, что чем большее количество методов применяется при оптимизации, тем выше потенциальный прирост эффективности.

### Заключение

В рамках данной статьи рассмотрены основные шаги, которые выполняются в рамках оптимизации по ключевым словам, дано определение ключевого слова, пары ключ/значения и булевых выражений, которые применяются для описания таргетинга рекламной кампании по ключевым словам, рассмотрен физический процесс доставки рекламной кампании на страницу, которую посетил пользователь, с учетом специфики данной страницы с позиции ключевых слов и различные подходы к оптимизации по ключевым словам.

Анализ подходов к оптимизации ключевых слов показал, что их использование позволяет дополнительно повысить CTR рекламных кампаний в среднем на 10-20 %.

Использование таргетинга по ключевым словам дает возможность гибко настраивать рекламные кампании, чтобы добиться наибольшей эффективности и в то же время упростить процесс управления инвентарем владельца сайтов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Plummer Joe, Rappaport Steve, Hall Taddy, Barocci Robert.* The Online advertising playbook // Wiley 2007, John Wiley & Sons, Inc, 2007, p. 28-32.
2. *Минаков И.А., Елкин Д.А., Вольман С.И.* Обзор подходов оптимизации интернет-рекламы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XI Междунар. конф., Самара, 22 июня – 24 июня 2009. – Самара: СНЦ РАН, 2009. – С. 634-643.
3. *Елкин Д.А., Минаков И.А., Вольман С.И.* Использование методов статистической оптимизации для улучшения эффективности показа интернет-рекламы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. – Самара, 21 – 23 июня 2010. – Самара: СНЦ РАН, 2010. – С. 577-585.
4. *Елкин Д.А., Минаков И.А., Вольман С.И.* Автоматическая оптимизация интернет-рекламы // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 228-232.
5. *Минаков И.А.* Алгоритм кластеризации семантических дескрипторов документов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. № 1 (23). С. 34-46.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2014 г.

## METHODS OF ONLINE ADVERTISING OPTIMIZATION BASED ON KEYWORDS AND KEYPAIRS ANALYSIS

*D.A. Elkin<sup>1</sup>, I.A. Minakov<sup>2</sup>, S.I. Volman<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> OOO Maxifier Development  
349, Novo-Sadovaya st., Samara, 443125, Russia

<sup>2</sup> Institution of the Russian Academy of Sciences Institute for the Control of Complex Systems of RAS  
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia

*The paper describes last trends in Internet advertisement area - keyword/key-value terms and optimization methods used based on keyword statistics. Article covers technical process of ad-deliveries, different optimization methods and their comparative analysis on real life scenarios.*

**Keywords:** *Online advertising, ad campaign, ad-servers, keywords, keywords optimization, keywords/keypairs.*

---

*Dmitry A. Elkin, Director of optimization, Maxifier Development.  
Igor A. Minakov, Senior Scientist, ICCS RAS.  
Simon I. Volman, Director of Technology, Maxifier Development.*

УДК 621.317

## СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ\*

**Ю.М. Иванов**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: fuego27@rambler.ru

*Рассматривается новый метод измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающий сокращение времени измерения. В отличие от известных методов, основанных на формировании двух дополнительных сигналов напряжения, выявлении моментов переходов сигналов через ноль и сравнении их мгновенных значений, реализация метода позволяет исключить погрешности по модулю фазосдвигающих блоков. Предлагается структурная схема информационно-измерительной системы, реализующей метод. Приводятся результаты анализа погрешности системы, обусловленной квантованием мгновенных значений сигналов. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения.*

**Ключевые слова:** гармонические сигналы, интегральные характеристики, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, погрешность.

Основной предпосылкой разработки и использования методов и средств измерения интегральных характеристик периодических сигналов (среднеквадратических значений (СКЗ) напряжения и тока, активной (АМ) и реактивной (РМ) мощности) по отдельным мгновенным значениям, не связанным с периодом входного сигнала, является существенное сокращение времени измерения и обеспечение возможности определения данных параметров за долю периода [1].

Однако большинство таких методов предназначено для измерения интегральных характеристик гармонических сигналов (ИХГС), что накладывает ограничения на область их применения. Поэтому подобные методы пригодны для определения характеристик определенного класса сигналов, близких к гармоническим, с последующей оценкой погрешности, обусловленной отклонением модели от реального сигнала [2].

Одним из возможных путей дальнейшего сокращения времени измерения ИХГС является использование дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных на определенный угол, то есть пространственное разделение мгновенных значений сигналов [3].

Если в качестве дополнительных сигналов использовать ортогональные составляющие входных, то это значительно упрощает алгоритм измерения ИХГС. Однако при реализации таких методов может возникнуть существенная частот-

---

\*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173-а).

Юрий Михайлович Иванов (к.т.н.), с.н.с. кафедры «Информационно-измерительная техника».

ная погрешность фазосдвигающего блока (ФСБ), производящего сдвиг входного сигнала на  $90^\circ$ . При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от  $90^\circ$  [4].

Исключение данного вида погрешности обеспечивают методы измерения ИХГС, в которых формируются дополнительные сигналы, сдвинутые относительно входного на произвольный (в общем случае) угол  $\Delta\alpha$ , и используются мгновенные значения как входного, так и дополнительных сигналов. Однако реализация подобных методов может привести к погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФСБ, которая заключается в том, что амплитуда входного сигнала будет отличаться от амплитудного значения сигнала на выходе ФСБ [5].

В [6] предложен метод измерения ИХГС, основанный на формировании двух дополнительных сигналов напряжения: первого – инверсного входному и второго – сдвинутого относительно входного на произвольный угол  $\Delta\alpha$ , который обеспечивает исключение данного вида погрешности.

Метод заключается в том, что в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , и сигнала, инверсного входному, измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного и входного напряжений измеряют вторые мгновенные значения входных сигналов напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным значениям.

Недостатком метода является достаточно большое время измерения, которое зависит от соотношения между моментом начала измерения и моментом равенства дополнительного и инверсного напряжений и длительности интервала времени между моментами равенства дополнительного и инверсного напряжений и входного и дополнительного сигналов напряжения.

В статье рассматривается новый метод определения ИХГС, реализация которого обеспечивает сокращение времени измерения.

Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы  $\Delta\alpha$  и  $2\Delta\alpha$  относительно входного, и сигнала, инверсного входному. При этом в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $2\Delta\alpha$ , и сигнала, инверсного входному, измеряют первые мгновенные значения входного напряжения и тока; в момент равенства дополнительного сигнала напряжения, сдвинутого по фазе относительно входного на угол  $\Delta\alpha$ , и сигнала, инверсного входному, измеряют вторые мгновенные значения входного напряжения и тока. ИХГС определяют по измеренным мгновенным значениям входного напряжения и тока.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

Если входное напряжение и ток имеют гармонические модели  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$  и  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ , то дополнительные напряжения примут вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ ,  $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ , а инверсный сигнал –  $u_4(t) = -U_m \sin \omega t$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega$  – угловая частота;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между входным напряжением и током.

В момент времени  $t_1$ , когда  $U_{31} = U_{41}$ , мгновенные значения сигналов будут равны:

$$U_{11} = U_m \sin \alpha_1; U_{41} = -U_m \sin \alpha_1; U_{31} = U_m \sin(\alpha_1 + 2\Delta\alpha); I_1 = I_m \sin(\alpha_1 + \varphi),$$

где  $\alpha_1$  – начальная фаза входного напряжения в момент времени  $t_1$ .

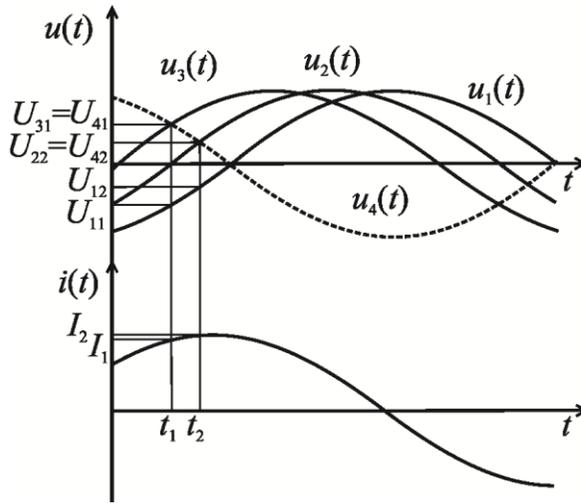


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Равенство мгновенных значений сигналов  $U_{31} = U_{41}$  будет выполняться, если  $-\alpha_1 = \alpha_1 + 2\Delta\alpha$  ( $\Delta\alpha \neq 0$ ), то есть когда  $2\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_1$  или  $\alpha_1 = \pi l - \Delta\alpha$ , где  $l=0, 1$ .

Отсюда  $U_{11} = \pm U_m \sin \Delta\alpha$ , а  $I_1 = \pm I_m \sin(\varphi - \Delta\alpha)$ .

В момент времени  $t_2$ , когда  $U_{22} = U_{42}$ , мгновенные значения сигналов примут вид

$$U_{12} = U_m \sin \alpha_2; U_{42} = -U_m \sin \alpha_2; U_{22} = U_m \sin(\alpha_2 + \Delta\alpha); I_2 = I_m \sin(\alpha_2 + \varphi),$$

где  $\alpha_2$  – начальная фаза входного напряжения в момент времени  $t_2$ .

Равенство мгновенных значений сигналов  $U_{22} = U_{42}$  выполняется в том случае, если  $-\alpha_2 = \alpha_2 + \Delta\alpha$ , то есть когда  $\Delta\alpha = 2\pi l - 2\alpha_2$  или  $\alpha_2 = \pi l - \frac{\Delta\alpha}{2}$ .

$$\text{Отсюда } U_{12} = \pm U_m \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \text{ и } I_2 = \pm I_m \sin\left(\varphi - \frac{\Delta\alpha}{2}\right).$$

На основе использования мгновенных значений сигналов после преобразований можно получить выражения для определения основных ИХГС:

– СКЗ напряжения и тока

$$U_{СКЗ} = \frac{\sqrt{2}U_{12}^2}{\sqrt{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (1)$$

$$I_{СКЗ} = \sqrt{\frac{U_{12}^2(I_1^2 + I_2^2) - U_{11}U_{12}I_1I_2}{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}; \quad (2)$$

– активная и реактивная мощности

$$P = \frac{|U_{12}| \left[ |U_{11}|(I_2|U_{11}| - I_1|U_{12}|) - 2U_{12}^2I_2 \right]}{4U_{12}^2 - U_{11}^2}; \quad (3)$$

$$Q = \frac{|U_{12}|(I_2|U_{11}| - I_1|U_{12}|)}{\sqrt{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}. \quad (4)$$

Метод можно реализовать с помощью следующей информационно-измерительной системы (ИИС) (рис. 2).

В состав ИИС входят: первичные преобразователи напряжения ППН и тока ППТ, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, компараторы КОМП1 и КОМП2, фазосдвигающие блоки ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющие сдвиг напряжения на угол  $\Delta\alpha$ , инвертор ИНВ, контроллер КНТ, шины управления ШУ и данных ШД.

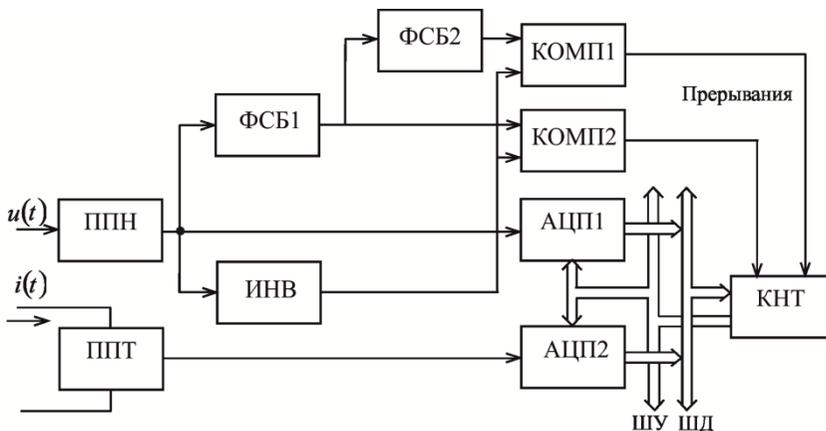


Рис. 2. Схема ИИС, реализующей метод

Анализ показывает, что если ФСБ1 и ФСБ2 идентичны, то в случае наличия погрешности по модулю фазосдвигающих блоков дополнительные напряжения примут вид

$$u'_2(t) = U'_m \sin(\omega t + \Delta\alpha); \quad u'_3(t) = U'_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha),$$

где  $U'_m$  – амплитудное значение напряжения на выходе фазосдвигающего блока.

В этом случае равенство мгновенных значений сигналов напряжения произойдет в моменты времени  $t'_1$  и  $t'_2$ :

$$U'_{31} = U'_{41} = U'_m \sin(\alpha'_1 + 2\Delta\alpha) \quad \text{и} \quad U'_{22} = U'_{42} = U'_m \sin(\alpha'_2 + \Delta\alpha).$$

Поскольку изначально считалось, угол сдвига  $\Delta\alpha$  – произвольный, то это не приведет к погрешности, а сместит моменты равенства сигналов. Таким образом, метод и реализующая его ИИС инвариантны к погрешности по модулю ФСБ.

Для ИИС характерна погрешность квантования, которая неизбежно возникает при реализации цифровых методов измерения. Для анализа влияния квантования мгновенных значений сигналов на погрешность определения ИХГС можно использовать известный подход к оценке погрешности вычисления значения функции, аргументы которой заданы приближенно, с помощью дифференциала этой функции [7]. Для получения предельных значений данного вида погрешности будем считать, что абсолютные погрешности аргументов соответствуют погрешностям квантования мгновенных значений.

В этом случае абсолютные погрешности определения СКЗ напряжения и тока, АМ и РМ в соответствии с (1) – (4) примут вид:

$$\Delta U_{СКЗ} = \left[ \left| (U_{СКЗ})'_{U_{11}} \right| + \left| (U_{СКЗ})'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U; \quad (5)$$

$$\Delta I_{СКЗ} = \left[ \left| (I_{СКЗ})'_{I_1} \right| + \left| (I_{СКЗ})'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| (I_{СКЗ})'_{U_{11}} \right| + \left| (I_{СКЗ})'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U; \quad (6)$$

$$\Delta P = \left[ \left| (P)'_{I_1} \right| + \left| (P)'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| (P)'_{U_{11}} \right| + \left| (P)'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U ; \quad (7)$$

$$\Delta Q = \left[ \left| (Q)'_{I_1} \right| + \left| (Q)'_{I_2} \right| \right] \Delta I + \left[ \left| (Q)'_{U_{11}} \right| + \left| (Q)'_{U_{12}} \right| \right] \Delta U , \quad (8)$$

где  $\Delta U = U_{np} / 2^n$ ;  $\Delta I = I_{np} / 2^n$ ;  $U_{np}$ ,  $I_{np}$  – максимально допустимые напряжение и ток;  $n$  – число двоичных разрядов АЦП.

Используя (5) – (8), можно определить относительные погрешности вычисления СКЗ напряжения и тока и приведенные погрешности измерения АМ и РМ:

$$\delta_U = \frac{\left| \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| + 2 \left| \cos \Delta\alpha \right|}{2^{n+1} \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right|} ; \quad (9)$$

$$\delta_I = \frac{1}{2^{n+1} \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right|} \left[ 2 \sin^2 \frac{\Delta\alpha}{2} \left( 2 \left| \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \sin \varphi \right| + \left| 2 \sin \frac{\Delta\alpha}{2} + \cos \varphi \right| \right) + \left| \cos \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \right| \times \right. \\ \left. \times \cos(\varphi - \Delta\alpha) + 2 \left| \sin^2 \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) - \cos^2(\varphi - \Delta\alpha) \right| \right] ; \quad (10)$$

$$\gamma_P = \frac{1}{2^n \sin^2 \frac{\Delta\alpha}{2}} \left[ 2 \left| \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \right| \left( \left| \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| + \left| \cos \Delta\alpha \right| \right) + \left| 2 \sin \varphi + \sin(\varphi - \Delta\alpha) + 2 \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \cos \varphi \right| + \right. \\ \left. + \left| \sin \left( \varphi - \frac{3\Delta\alpha}{2} \right) + 4 \sin \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) - 2 \cos \varphi \right| \right] ; \quad (11)$$

$$\gamma_Q = \frac{1 + 2 \left| \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| + \left| \sin^2 \frac{\Delta\alpha}{2} \sin \left( \varphi - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) + \sin \varphi \cos \frac{\Delta\alpha}{2} \right| + \left| \sin \varphi \right| \cos^2 \frac{\Delta\alpha}{2}}{2^n \left| \sin^3 \frac{\Delta\alpha}{2} \right|} . \quad (12)$$

Анализ выражений (9) – (12) показывает, что погрешность определения СКЗ напряжения зависит только от числа разрядов АЦП  $n$  и угла сдвига фазы ФСБ  $\Delta\alpha$ . Погрешности измерения СКЗ тока, АМ и РМ определяются еще и углом сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi$ . Полученные результаты позволяют выявлять оптимальные параметры фазосдвигающих блоков, при которых погрешности измерения ИХГС минимальны.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: Физматлит, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Сеницын А.Е. Оценка погрешности метода измерения интегральных характеристик с использованием пространственного и временного разделения мгновенных значений гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2012. – № 3 (28). – С. 199-202.
3. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Синтез и анализ методов оперативного измерения параметров периодических процессов на основе формирования дополнительных сигналов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI междунар.

- конф. – Самара: Самарский науч. центр РАН, 2014. – С. 717-722.
4. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Симицын А.Е. Синтез методов измерения интегральных характеристик по мгновенным значениям ортогональных составляющих гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 3 (35). – С. 84-89.
  5. Иванов Ю.М., Симицын А.Е., Симонов А.В. Оценка погрешности средства измерения интегральных характеристик гармонических сигналов с фазосдвигающими блоками // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 1 (37). – С. 48-52.
  6. Мелентьев В.С., Муратова В.В., Иванов Ю.М. Метод измерения характеристик периодических процессов, инвариантный к погрешностям формирования дополнительного сигнала // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т. 16, №1(2). – С. 439-443.
  7. Иванов Ю.М. Анализ влияния погрешности квантования на результат измерения интегральных характеристик гармонических сигналов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – № 4 (40). – 2013. – С. 67-71.

*Статья поступила в редакцию 1 июля 2014 г.*

## **THE REDUCTION OF MEASUREMENT TIME OF PERIODIC SIGNALS CHARACTERISTICS BASED ON THE FORMATION OF ADDITIONAL VOLTAGE SIGNALS**

***Ju.M. Ivanov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*A new measurement method of the integral characteristics on the instant values of harmonic signal, providing reduction of measurement time, is considered. In contrast to known methods based on two additional voltage signals formation, identifying the transition moments through zero and comparing their instant values, the development of the method eliminates modulo errors of phase-shifting units. A block diagram of the information-measuring system is offered as a result of the method. The results of the analysis of system error caused by the quantization of the instantaneous values of signals are given. The obtained results allow to choose the appropriate hardware, depending on the imposed requirements of the accuracy and measurement time.*

***Keywords:*** *harmonic signals, integral characteristics, instant values, additional signals, phase-shifting units, an error.*

УДК 62.002.3:681.2

## КОРРЕКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППРОКСИМАЦИИ\*

*П.К. Ланге<sup>1</sup>, И.А. Платонов<sup>2</sup>, М.Б. Унгаров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва  
Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34

*Рассмотрена задача коррекции нелинейности характеристик современных микродатчиков, при этом используется аппроксимация их дискретных значений. Коррекция нелинейности осуществляется с использованием либо прямой, либо обратной функции характеристики датчика. В качестве аппроксимирующей функции характеристики датчика использована кубическая сплайн-функция. Аппроксимирующая функция реализуется микропроцессорным аналоговым конвертером. Рассмотрены схемы корректирующих блоков с включением корректирующего функционального преобразователя в прямую цепь, а также в цепь отрицательной обратной связи входного буферного усилителя. Показано, что предлагаемая схема позволяет снизить погрешность нелинейности характеристики датчика в несколько десятков раз.*

**Ключевые слова:** характеристика датчика, нелинейность характеристики, обратная функция, коррекция нелинейности, аппроксимация, усилитель.

В настоящее время микродатчики начинают широко применяться в различных промышленных приложениях, а также в портативных системах анализа состава и свойств веществ. Характеристики таких датчиков имеют определенную нелинейность, кроме того, их вид может изменяться для различных режимов работы.

Важным преимуществом таких датчиков является малая постоянная времени, что обеспечивает малую динамическую погрешность при измерении быстро изменяющихся параметров. Тем не менее использование таких микродатчиков ограничивается сильной нелинейностью их характеристик.

Обычно для определения характеристики датчика при его метрологической аттестации используют ограниченный набор поверочных опытов. В качестве примера можно привести характеристику датчика AWM2300 фирмы Honeywell, значения которой (в соответствии с фирменным описанием) приведены в таблице, определенной по фирменной характеристике датчика.

**Значения характеристики датчика AWM2300**

Расход $q_x$	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	0	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0
Вых. сигнал $U_y$ , мВ	-31	-30	-28	-24	-18	0	18	24	28	30	31

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-08-00700.

*Петр Константинович Ланге (д.т.н. проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».*

*Игорь Артемьевич Платонов (д.т.н. проф.), зав. кафедрой «Химия» СГАУ.*

*Марат Булатович Унгаров, аспирант.*

Аналогичный вид имеют характеристики микродатчиков расхода серии PFMV5.

Аппроксимация приведенных табличных значений

$$x = q_x / q_{\max}, \quad y = U_y / U_{y \max},$$

где  $q_{\max}$ ,  $U_{y \max}$  – максимальные значения входного параметра (в данном случае расхода газа) и выходного сигнала соответственно, кубическая сплайн-функция  $y = f(x)$  представлена на рис. 1.

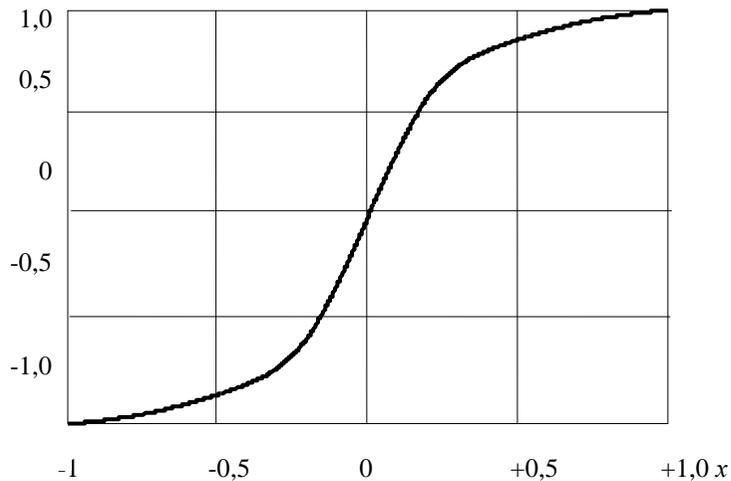


Рис. 1. Кубическая сплайн-аппроксимация прямой функции  $f(x)$  датчика

Из рассмотрения рисунка видно, что в полном диапазоне входного параметра погрешность нелинейности характеристики достигает 40 %. Это вынуждает с целью снижения этой погрешности использовать очень малый диапазон входного параметра, порядка 10 % его полного диапазона.

Снизить погрешность нелинейности можно, используя одну из схем, изображенных на рис. 2 и рис. 3.

В схеме, изображенной на рис. 2, сигнал  $U_x$ , формируемый датчиком Д, поступает на вход неинвертирующего повторителя (на усилителе DA), а затем – на вход функционального преобразователя ФП, реализующего функцию  $z = f(y) = f^{-1}(x)$ , обратную функции  $f(x)$  нелинейной характеристики датчика.

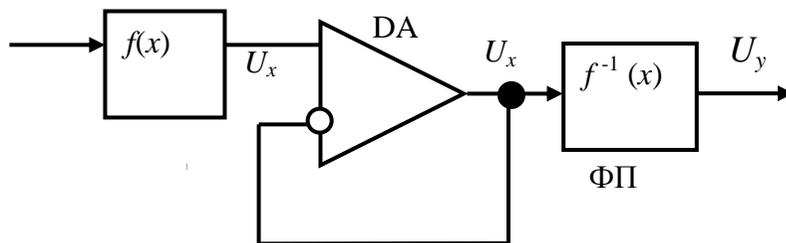


Рис. 2. Схема для линеаризации характеристики датчика с использованием обратной функции его характеристики

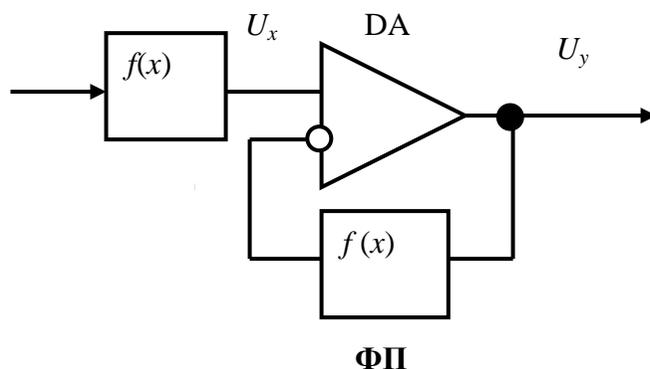


Рис. 3. Схема для линейризации характеристики датчика с использованием прямой функции его характеристики

Аппроксимацию обратной функции [1] нелинейной характеристики датчика можно легко определить на основании значений, приведенных в таблице.

Кубическая сплайн-аппроксимация такой функции приведена на рис. 4.

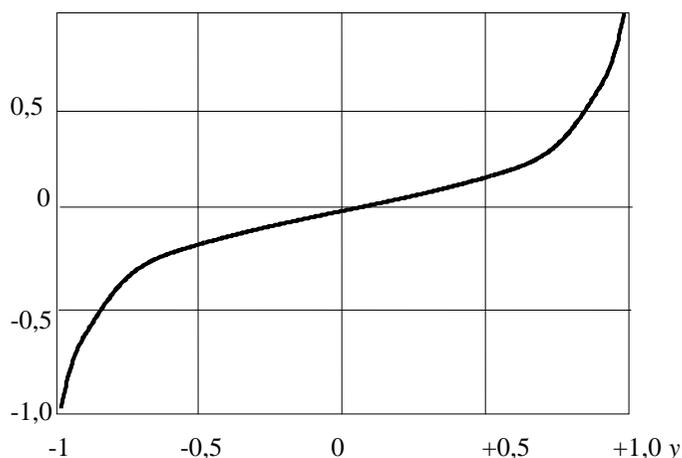


Рис. 4. Кубическая сплайн-аппроксимация функции  $z = f(y)$ , обратной прямой функции  $f(x)$  датчика

В схеме, изображенной на рис. 3, функциональный преобразователь ФП реализует функцию, идентичную нелинейной характеристике  $f(x)$  датчика, этот преобразователь включен в цепь отрицательной обратной связи усилителя DA. Следует заметить, что усилитель DA обычно входит в стандартную схему формирования выходного сигнала датчика, рекомендуемую его фирмой-изготовителем.

В обоих случаях происходит коррекция погрешности, вызванной нелинейностью характеристики датчика, то есть в идеальном случае схема реализует линейную зависимость

$$U_y = f^{-1}[f(x)] = kx .$$

На практике, однако, погрешность таких схем будет определяться погрешностью аппроксимации табличных значений характеристики датчика.

Рассмотрим такую погрешность для схем, изображенных на рис. 1, рис. 2, на примере датчика, значения характеристики которого приведены в таблице.

График такой результирующей приведенной погрешности коррекции нелинейной характеристики датчика

$$\delta x = (f^{-1}[f(x)] - x) \cdot 100 \%$$

приведен на рис. 5. Как видно из рассмотрения этого графика, погрешность коррекции нелинейности датчика в полном диапазоне входного параметра не превышает 1 %, что удовлетворяет требованиям значительного количества практических приложений. Следует заметить, что воспроизводимость характеристик таких датчиков (в частности серии PFMV5) составляет  $\pm 2 \%$ .

В качестве функционального преобразователя ФП (см. рис. 1, рис. 2) может быть выбран микропроцессорный аналоговый конвертор типа ADuC831, ADuC834 фирмы Analog Devices.

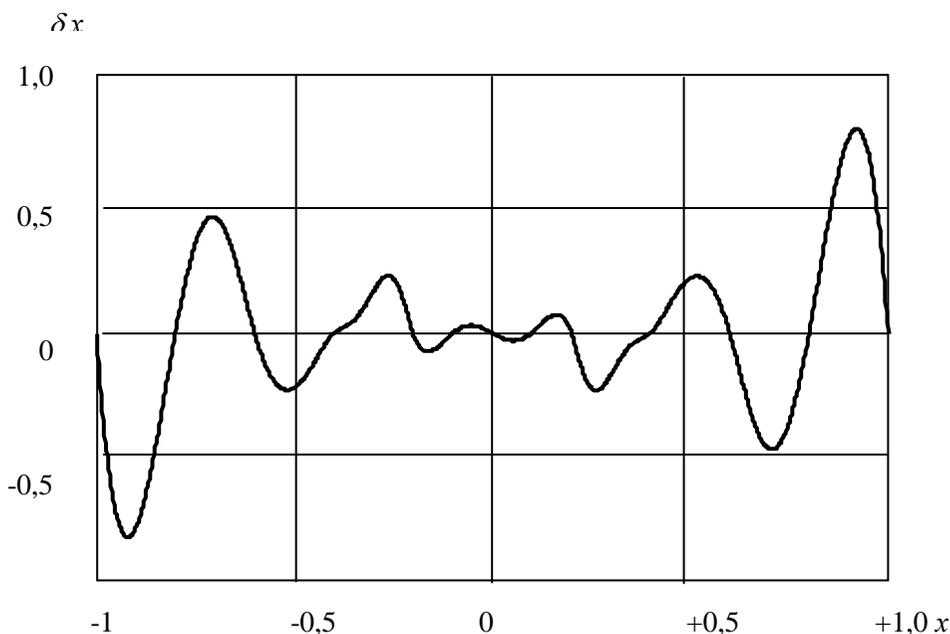


Рис. 5. График  $\delta x$  приведенной погрешности в системе коррекции нелинейной характеристики датчика

Этот конвертер на  $n$ -м участке дискретизации характеристики датчика реализует кубическую сплайн-аппроксимацию

$$y(x) = a_3[n]x^3 + a_2[n]x^2 + a_1[n] + a_0[n],$$

коэффициенты которой вычисляются по формулам [2]

$$a_0[n] = \frac{1}{36}(-x[n-2] + 4x[n-1] + 30x[n] + 4x[n+1] - x[n+2]);$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1[n] = \frac{1}{12x_d} (x[n-2] - 8x[n-1] + 8x[n+1] - x[n+2]); \\ a_2[n] = \frac{1}{12x_d^2} (-x[n-2] + 10x[n-1] - 18x[n] + 10x[n+1] - x[n+2]); \\ a_3[n] = \frac{1}{36x_d^3} (x[n-2] - 11x[n-1] + 28x[n] - 28x[n+1] + 11x[n+2] - x[n+3]). \end{array} \right.$$

Эти формулы представляют собой выражения цифровой фильтрации, достаточно просто реализуемые микропроцессорным аналоговым конвертером.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Солопченко Г.Н.* Обратные задачи в измерительных процедурах // Измерение, контроль, автоматизация. ЦНИИТЭИприборостроения. – 1983. – Вып. 2(46). – С. 32-46.
2. *Ланге П.К.* Сплайн-аппроксимация дискретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // Сб. трудов Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – Самара: СамГТУ, 2003. – Вып. 19. – С. 134-138.

*Статья поступила в редакцию 5 июля 2014 г.*

## NON - LINEARITY CHARACTERISTICS CORRECTION IN SENSORS WITH APPROXIMATION USING

*P.K. Lange<sup>1</sup>, I.A. Platonov<sup>2</sup>, M.B. Ungarov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University  
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russian Federation

*The problem of nonlinearity characteristics correction of modern microsensors, with use of approximation discrete characteristics is considered. Linearity correction is performed with the use of either direct or inverse characteristics of the sensors. As approximating function of the sensor characteristic a cubic spline - function is used. Approximating function is done by the microprocessor analog converter. The schemes of correcting converter with a functional transducer in a straight chain as well as in a negative feedback of the buffer amplifier are considered. The proposed device can reduce the nonlinearity error sensor characteristics in a few dozen times.*

**Keywords:** *sensor characteristic, nonlinearity characteristic, an inverse function, the correction of non-linearity, approximation, amplifier.*

---

*Petr K. Lange (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Igor A. Platonov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Marat B. Ungarov, Postgraduate Student.*

УДК 621.317

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПО ОТДЕЛЬНЫМ МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ\*

*В.С. Мелентьев, Е.Е. Ярославкина, Е.В. Павленко*

Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mails: vs\_mel@mail.ru, muratova1991@yandex.ru, makarovak@inbox.ru, Yaelenkapavlenko@yandex.ru

*Приводятся результаты анализа методов измерения частоты по мгновенным значениям гармонических сигналов, обеспечивающих сокращение времени измерения. Рассматривается новый метод измерения частоты гармонических сигналов, основанный на формировании двух дополнительных сигналов напряжения и выявлении моментов переходов сигналов через ноль. Предлагается структурная схема средства измерения, реализующего метод. Реализация метода обеспечивает исключение погрешности, которая обусловлена неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения и заданного диапазона частот.*

**Ключевые слова:** гармонические сигналы, частота, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, погрешность.

Задачи измерения и контроля частоты электрических сигналов находят широкое применение в электроэнергетике, технике связи, автоматизированном управлении технологическими процессами, при определении параметров датчиков различных физических величин с частотным выходным сигналом.

Для выявления предаварийных и аварийных режимов работы энергообъектов и электротехнического оборудования, при контроле быстропротекающих процессов требуется создание методов и средств измерения (СИ) частоты, обеспечивающих высокое быстродействие и точность.

Для сокращения времени измерения частоты и других параметров периодических сигналов, форма которых близка к гармонической, может быть использован аппроксимационный подход, основанный на привлечении априорной информации о модели измерительного сигнала для определения его параметров. В качестве модели периодического сигнала обычно выбирают гармоническую с по-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО «СамГТУ» (код проекта: 1392).

*Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

*Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».*

*Елена Владиславовна Павленко, аспирант.*

следующей оценкой погрешности, обусловленной несоответствием принятой модели виду реального сигнала [1].

Методы и СИ, использующие данный подход и основанные на определении частоты по отдельным мгновенным значениям гармонического сигнала, не связанным с его периодом, могут обеспечить время измерения менее периода входного сигнала [2].

Существенно сократить время измерения частоты позволяют методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе [3].

Однако при реализации методов, использующих в качестве дополнительного сигнала ортогональную составляющую входного, возникает существенная частотная погрешность фазосдвигающего блока (ФСБ), производящего сдвиг входного сигнала на угол  $90^\circ$ . При изменении частоты угол сдвига фазы ФСБ может отличаться от  $90^\circ$  [4].

Данный недостаток устраняется в методах измерения частоты [5, 6], в которых формируются дополнительные сигналы, сдвинутые относительно входного на произвольный (в общем случае) угол  $\Delta\alpha$ , и используются мгновенные значения как входного, так и дополнительных сигналов.

Однако реализация данных методов может привести к погрешности по напряжению (погрешности по модулю) ФСБ, в соответствии с которой амплитуда входного сигнала будет отличаться от амплитудного значения сигнала на выходе ФСБ [7].

В статье рассматривается новый метод измерения частоты гармонического сигнала, реализация которого обеспечивает исключение как частотной погрешности, так и погрешности по модулю ФСБ.

Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы  $\Delta\alpha$  и  $2\Delta\alpha$  относительно входного, и измерении мгновенных значений только входного напряжения. Причем в момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на  $2\Delta\alpha$ , измеряют первое мгновенное значение входного сигнала. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на  $\Delta\alpha$ , измеряют второе мгновенное значение входного сигнала. Через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента перехода через ноль входного напряжения измеряют его мгновенное значение. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям входного напряжения.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

Если входное напряжение имеет гармоническую модель  $u_1(t) = U_m \sin \omega t$ , то дополнительные сигналы примут вид  $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \Delta\alpha)$ ,  $u_3(t) = U_m \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения;  $\omega$  – угловая частота.

В момент времени  $t_1$ , когда сигнал  $u_3(t)$  переходит через ноль, мгновенное значение входного напряжения будет равно  $U_1 = U_m \sin(-2\Delta\alpha)$ .

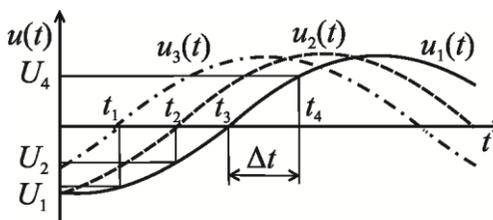


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

В момент времени  $t_2$ , когда сигнал  $u_2(t)$  переходит через ноль, мгновенное значение входного сигнала примет вид  $U_2 = U_m \sin(-\Delta\alpha)$ .

Через образцовый интервал времени  $\Delta t$  с момента перехода через ноль входного напряжения (момент времени  $t_3$ ) в момент времени  $t_4$  его мгновенное значение будет равно  $U_4 = U_m \sin \omega\Delta t$ .

Используя мгновенные значения, можно определить частоту сигнала:

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arcsin \frac{|U_4| \sqrt{4U_2^2 - U_1^2}}{2U_2^2}. \quad (1)$$

Анализ показывает, что частота сигнала не зависит от величины угла сдвига фазы  $\Delta\alpha$ .

Схема средства измерения, реализующего метод, приведена на рис. 2.

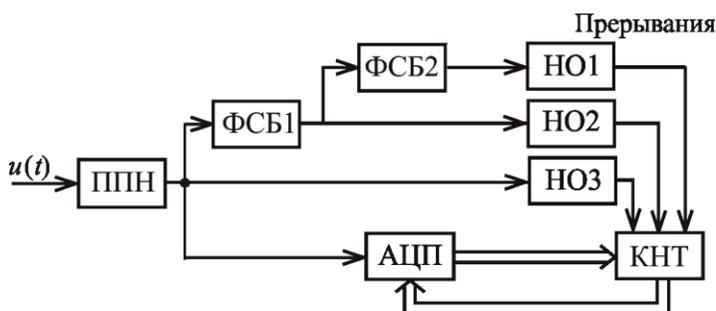


Рис. 2. Схема СИ, реализующего метод

СИ содержит: первичный преобразователь напряжения ППН, два фазосдвигающих блока ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющих сдвиг сигналов на угол  $\Delta\alpha$ , аналого-цифровой преобразователь АЦП, три нуля-органа НО1 – НО3 и контроллер КНТ.

Выражение для определения частоты (1) справедливо только для гармонических сигналов.

Проведем анализ погрешности метода из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели, используя методику, предложенную в [8]. Методика заключается в оценке погрешности результата измерения частоты как функции, аргументы которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

Согласно выражению (1) предельная абсолютная погрешность определения частоты сигнала примет вид

$$\Delta f = \left[ \left| \frac{\partial f}{\partial U_1} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_2} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_4} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (2)$$

где  $\Delta U_{\max} = U_{m1} \sum_{k=2}^{\infty} h_k$  – максимальное отклонение сигнала от гармонической модели;  $U_{m1}$  – амплитудное значение первой гармоники напряжения;  $U_{mk}$  – амплитудное значение  $k$ -й гармоники напряжения;  $h_k = \frac{U_{mk}}{U_{m1}}$  – коэффициент  $k$ -й гармоники напряжения.

В соответствии с (1) и (2) относительная погрешность определения частоты сигнала будет равна

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_k \left[ \sin \omega \Delta t \left( |\cos \Delta \alpha| + 2|\cos 2\Delta \alpha| \right) + 2|\sin^3 \Delta \alpha| \right]}{2\omega \Delta t |\cos \omega \Delta t \sin^3 \Delta \alpha|}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что погрешность определения частоты зависит от гармонического состава сигнала, величины образцового интервала времени  $\Delta t$  и угла сдвига фазы ФСБ  $\Delta \alpha$ .

На рис. 3 представлен график зависимости погрешности определения частоты от  $\omega \Delta t$  и  $\Delta \alpha$  при наличии в сигнале первой и третьей гармоники с  $h_k = 0,1 \%$

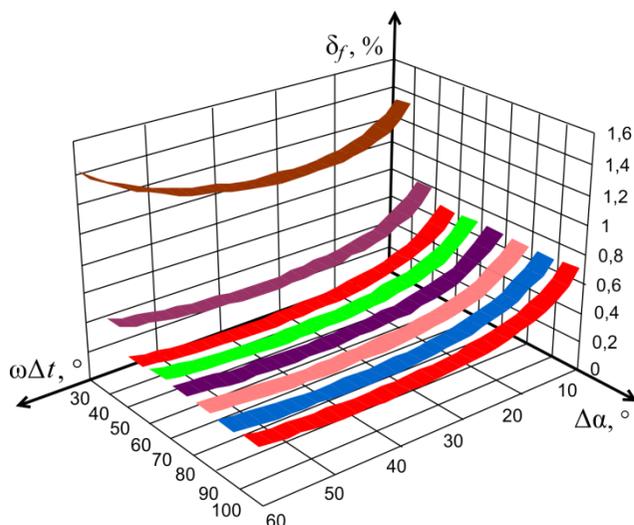


Рис. 3. Графики зависимости погрешности измерения частоты от  $\omega \Delta t$  и  $\Delta \alpha$

Анализ рис. 3 показывает, что погрешность определения частоты существенно зависит от угла сдвига фазы ФСБ, однако при  $\Delta \alpha \geq 50^\circ$  практически не изменяется. Кроме того, погрешность зависит от длительности образцового интервала времени  $\Delta t$  по отношению к периоду входного сигнала. При этом минимальные значения погрешности имеют место при  $20^\circ < \omega \Delta t < 50^\circ$ .

Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения и заданного диапазона частот.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: Физматлит, 2011. – 240 с.
2. Мелентьев В.С. Измерительно-моделирующий подход к определению частоты сигналов // Современные информационные технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГТА, 2005. – Вып. 2. – С. 49-51.
3. Мелентьев В.С., Синицын А.Е., Миронов А.А. Методы измерения частоты на основе сравнения гармонических сигналов, сдвинутых в пространстве и разделенных во времени // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. техн.

- ун-т, 2013. – № 1(8). – С. 75-79.
4. Мелентьев В.С., Сеницын А.Е., Муратова В.В. Анализ метода измерения частоты гармонического сигнала по мгновенным значениям ортогональных составляющих напряжения // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – № 1(9). – С. 89-92.
  5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Миронов А.А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198-201.
  6. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Муратова В.В. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов по мгновенным значениям сигналов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2(6). – С. 32-34.
  7. Мелентьев В.С., Ярославкина Е.Е., Сеницын А.Е. Исследование влияния погрешности фазосдвигающего блока на точность измерения частоты гармонического сигнала // Техника и технологии: пути инновационного развития: Матер. III Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 126-129.
  8. Мелентьев В.С., Миронов А.А., Муратова В.В. Анализ погрешности метода измерения частоты из-за отклонения сигнала от гармонической модели // Математическое моделирование и крайние задачи: Тр. IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Ч. 2. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 111-114.

*Статья поступила в редакцию 1 июля 2014 г.*

## **INCREASE THE FREQUENCY ACCURACY MEASUREMENT ON SEPARATE INSTANT VALUES OF HARMONIC SIGNALS**

***V.S. Melent'ev, E.E. Jaroslavkina, E.V. Pavlenko***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The results of the analysis of methods for measuring the frequency on instant values of harmonic signals that reduce the measurement time. A new method of measuring the frequency of harmonic signals, based on the formation of two additional voltage signals and identifying the moments of transitions through zero is considered. The block diagram of measurement tool that implement the method is provided. Implementation of the method provides an exception of the error caused not ideal phase-shifting units engaged in shaping of additional signals. The results of the analysis of the method error due to the deviation of the actual signal from the harmonic model. The obtained results allow to select the appropriate hardware and parameters of the measurement process, depending on the requirements of accuracy and measurement time and the specified frequency range.*

***Keywords:*** *frequency of signals, harmonic signals, instant values, additional signals, phase-shifting units, an error.*

---

*Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Ekaterina E. Jaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Elena V. Pavlenko, Postgraduate Student.*

УДК 681.518:681.11.031

## **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ И КОНТРОЛЕ ОСНОВНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ХРОНОМЕТРИИ**

***В.Н. Яшин***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vlyashin@yandex.ru.

*Рассмотрены методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии. Показано различие между подходами при измерении и контроле одной из основных метрологических характеристик технических средств хронометрии – мгновенного суточного хода. Предложены алгоритмы, позволяющие произвести метрологическую оценку измерения мгновенного суточного хода и определить абсолютную достоверность контроля мгновенного суточного хода. Полученные результаты позволяют методически более правильно подойти к анализу процессов измерения и контроля не только в области хронометрии, но и в целом в практике измерения и контроля физических величин.*

**Ключевые слова:** *контроль, измерение, информационный процесс, метрологические характеристики, технические средства хронометрии, достоверность.*

Измерение и контроль представляют собой информационные процессы, которые содержат как общие, так и различающиеся процедуры. Поэтому в общем случае не вызывает сомнения тот факт, что в основе любого процесса контроля лежат и процедуры, свойственные измерительному процессу. Справедливым будет и обратное утверждение – в измерительном процессе присутствуют процедуры, свойственные контролю. Однако такая сложная взаимосвязь этих процессов не дает оснований подменять процессы контроля измерением и называть измерительные системы системами контроля, что в последнее время достаточно часто наблюдается в отечественной научно-технической литературе. Рассмотрим методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии, позволяющие выявить сходства и различия между измерением и контролем. Технические средства хронометрии (ТСХ) – технические средства получения, отображения, переработки или передачи на расстояние хронометрической информации. Понятие «хронометрическая информация» означает измерительную информацию, получаемую в результате измерения интервалов времени.

Таким образом, основной задачей при написании данной статьи являлось формирование методологических подходов, позволяющих выявить сходства и различия между измерением и контролем основных метрологических характеристик ТСХ, а также получение метрологической оценки и абсолютной достоверности при измерении и контроле одной из основных метрологических характеристик ТСХ – мгновенного суточного хода.

---

*Владимир Николаевич Яшин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».*

Установим сходства и различия между измерением и контролем, которые могут быть рассмотрены как на уровне определений этих понятий, так и на уровне видов, методов, средств и получаемых результатов, т. е. на методологическом уровне.

Дадим определения понятиям измерения и контроля в соответствии с нормативно-технической документацией.

Измерением согласно РМГ 29-99 (Рекомендации по межгосударственной стандартизации, взамен ГОСТ 16263-70) называется совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей измерения и получение значения этой величины.

Контролем называется (ГОСТ 16504-81) проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. С одной стороны, эти определения подчеркивают различия между этими процессами, с другой – сходства.

Различия между ними лежат в плоскости получаемых результатов: результатом измерения является нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины, т. е. получение количественной характеристики. Результатом же контроля является проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям, т. е. получение качественной характеристики. Кроме того, среди получаемых при измерении количественных характеристик одной из основных является погрешность измерения, а при контроле – его достоверность.

Для ТСХ такими количественными характеристиками измерения являются: мгновенный ход, среднее значение мгновенного хода, мгновенный суточный ход и т. д. Перечисленные характеристики определяют погрешность измерения интервалов времени с помощью ТСХ. Качественной же характеристикой контроля ТСХ может быть выбрана характеристика годности или негодности ТСХ по любой из перечисленных выше характеристик с заданной достоверностью контроля.

При детальном анализе приведенных выше определений могут быть выявлены и сходства между процессами измерения и контроля. Так, проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям означает проведение операций, свойственных процессу измерения: фильтрации, сравнения с мерой или величиной допуска на измеряемую характеристику, измерительного преобразования и т. д.

Различия и сходства между измерением и контролем проявляются также на уровне видов измерения и контроля. Измерения по виду делятся на измерения геометрических величин, механических величин, объема веществ, давления, интервалов времени и т. д., а контроль – на сплошной, выборочный, периодический и т. д. В нашем случае для ТСХ видом измерения является измерение интервалов времени, а для контроля ТСХ характерно использование большинства из перечисленных видов контроля.

Различия и сходства между измерением и контролем лежат и в плоскости методов измерения и контроля. Под методом измерения понимается прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений, а под методом контроля – правила применения определенных принципов и средств контроля, т. е. различия уже заложены в самих определениях.

Для ТСХ применяется большинство из существующих методов измерения (метод непосредственной оценки, метод сравнения с мерой, метод измерений

замещением, метод измерений дополнением, тестовый метод измерений и т. д.). К методам контроля относят, как правило, методы разрушающего контроля и методы неразрушающего контроля. Для ТСХ используются в основном методы неразрушающего контроля.

Однако наряду с различиями в методах измерения и контроля имеются и сходства. Это, в первую очередь, относится к физическим процессам, лежащим в основе измерения и контроля: магнитным, электрическим, оптическим, акустическим и т. д., которые применяют как при измерении, так и контроле ТСХ.

На уровне применяемых технических средств при проведении измерения и контроля также можно выделить сходства и различия между ними.

Таким образом, на методологическом уровне существуют сходства и различия между процессами измерения и контроля, которые необходимо учитывать при описании этих процессов.

Исходя из вышесказанного рассмотрим процессы измерения и контроля ТСХ на примере измерения и контроля мгновенного суточного хода, который занимает существенное место среди метрологических характеристик ТСХ. В ТСХ под ходом понимают разность поправок, взятых в начале и конце интервала измерения времени. Мгновенный суточный ход является производной характеристикой от мгновенного хода, который представляет собой приращение погрешности измерения времени  $\Delta t$  за некоторое достаточное малое время  $dt$ , т. е.

$$\Omega_0(t) = \Delta t(t + dt) - \Delta t(t). \quad (1)$$

Однако при измерении и контроле ТСХ наибольшее применение находит мгновенный суточный  $\Omega_{oc}(t)$ , который определяется в соответствии с формулой

$$\Omega_{oc}(t) = 86400 \left( \frac{T_{cp} - T_n}{T_n} \right) = 86400 \frac{\Delta T_{cp}}{T_n}, \quad (2)$$

где  $T_{cp}$  – среднее значение периода колебаний осциллятора ТСХ;

$\Delta T_{cp}$  – среднее значение отклонения текущего периода колебания осциллятора от своего номинального значения;

$T_n$  – номинальное значение периода колебаний осциллятора ТСХ, задаваемое конструктивно;

86400 – число секунд в сутках.

Для измерения мгновенного суточного хода применяют различные методы, однако в настоящее время широко используется цифровой метод, основанный на квантовании заданного промежутка времени импульсами кварцевого генератора. Оценка мгновенного суточного хода  $\hat{\Omega}_{oc}$  производится по следующей зависимости [1]:

$$\hat{\Omega}_{oc} = fLT - 86400,$$

где  $f$  – частота импульсов кварцевого генератора;

$LT$  – интервал измерения.

Частоту кварцевого генератора определяют исходя из номинального периода колебаний осциллятора ТСХ по формуле

$$f = \frac{86400}{LT_n} = \frac{86400}{\theta_n}.$$

Результатом измерения мгновенного суточного хода будет его метрологиче-

ская оценка, которая может быть записана в виде  $\hat{\Omega}_{oc} = \Omega_{oc} \pm \Delta$ , где  $\Delta$  – абсолютная погрешность измерения суточного хода. Погрешность измерения мгновенного суточного хода по существующей классификации в области погрешностей измерений может быть отнесена: по способу математического выражения – к абсолютной, относительной или приведенной погрешности; по зависимости от изменений во времени – к статической или динамической погрешности; по характеру проявления – к систематической или случайной погрешности, и т. д. Таким образом, для определения погрешности, в том числе и погрешности мгновенного значения суточного хода, необходимо проанализировать и учесть все составляющие общей погрешности. Полученные экспериментальные данные измерения мгновенного суточного хода цифровым методом ТСХ (механический хронометр) показали, что наибольший вклад в погрешность измерения мгновенного суточного хода по месту возникновения вносит методическая погрешность, а по характеру проявления – случайная погрешность. Остальными погрешностями можно в данном случае пренебречь. При измерении мгновенного суточного хода методическая погрешность обусловлена в основном погрешностью квантования. Если принять, например, интервал измерения равным  $\theta = LT_n = 0,4$  с (в практике измерений мгновенного суточного хода интервал измерений варьируется от 0,4 до 30 с), то частота кварцевого генератора будет равна 216000 Гц и абсолютная погрешность квантования при измерении мгновенного значения суточного хода составит  $\Delta = \pm \frac{1}{f} = 0,463 \cdot 10^{-5}$  с. С увеличением интервала измерения  $\theta = LT_n$  частота кварцевого генератора должна быть уменьшена и погрешность квантования возрастет, так при  $\theta = LT_n = 30$  с  $\Delta = \pm 0,347 \cdot 10^{-3}$ . При выбранных интервалах измерения методическая погрешность остается незначительной и ею можно пренебречь.

Для оценки случайной составляющей погрешности измерения мгновенного суточного хода определим ряд статистических характеристик на основе данных, приведенных в таблице. Данные получены экспериментально при измерении мгновенного суточного хода ТСХ (механического хронометра) цифровым методом. В таблице:  $T_{отс.}$  – временные отсчеты в часах, соответствующие моментам времени измерения мгновенного суточного хода цифровым методом, временной интервал между отсчетами составлял 1 час;  $\Omega_{oc}$  (с) – мгновенные значения суточных ходов в секундах, измеренные через временной интервал, равный 1 часу.

$T_{отс.}$ (ч)	$\Omega_{oc}$ (с)						
1	1,81	7	8,81	13	7,08	19	4,62
2	-2,72	8	3,02	14	8,34	20	6,85
3	0,11	9	3,89	15	4,64	21	3,15
4	1,88	10	4,10	16	8,83	22	-0,02
5	-0,28	11	-0,43	17	6,59	23	1,08
6	2,42	12	1,81	18	-1,23	24	0,00

На основе данных, приведенных в таблице, найдем оценку математического ожидания  $\hat{M}_{\Omega_{oc}}$  мгновенных суточных ходов по формуле

$$\hat{M}_{\Omega_{oc}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Omega_{oc}}{n} = 3,32 \text{ с.}$$

Определим стандартное отклонение среднего по формуле

$$\sigma_{\hat{M}} = \sqrt{\frac{(\Omega_{oc} - \hat{M}_{\Omega})^2}{n(n-1)}} = 0,7 \text{ с.}$$

Таким образом, результат измерения мгновенного значения суточного хода можно записать в виде

$$\hat{\Omega}_{oc} = \Omega_{oc} \pm \Delta = 3,32 \pm 0,70 \text{ с.}$$

В теории и практике измерений существует ряд проблем, связанных с низким уровнем автоматизации при получении метрологической оценки. Выход из этого положения, на взгляд автора статьи, состоит в его повышении за счет широкого применения информационных технологий [2].

В отличие от измерения, одной из основных характеристик качества контроля является его достоверность. Количественной оценкой достоверности контроля является абсолютная достоверность (априорная или апостериорная), представляющая собой вероятность принятия правильного решения при контроле. Данная оценка определяется на основе соотношения

$$D = 1 - P_{ош},$$

где  $P_{ош}$  – вероятность ошибочных решений при контроле.

Вероятность принятия ошибочных решений при контроле определяется ошибками контроля, являющимися случайными событиями. Ошибки контроля зависят от многих факторов, среди которых существенное место занимают погрешности средств измерения, применяемых при контроле, и величина допусков (норм), устанавливаемых на контролируемые параметры. Наличие погрешностей измерений средств контроля приводит к необходимости учета ошибок первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода, которые и определяют вероятность принятия ошибочных решений при контроле, т. е.  $P_{ош} = \alpha + \beta$ . Выражение для оценки апостериорной абсолютной достоверности при этом может быть представлено в виде

$$D = 1 - (\alpha + \beta)$$

Ошибки первого рода (риск изготовителя) определяют вероятность отнесения годных объектов контроля к негодным. Ошибки второго рода (риск заказчика) – вероятность отнесения негодных объектов к годным.

Для определения указанных ошибок контроля рассмотрим процедуру цифрового контроля мгновенного суточного хода  $\Omega_{oc}$ , который представим в виде случайной величины с плотностью распределения  $W(\Omega_{oc})$ . На параметр  $\Omega_{oc}$  заданы значения допусков в виде нижнего  $\Omega_H$  и верхнего  $\Omega_B$  пределов. В устройстве цифрового контроля результат измерения может быть представлен в виде

$$\hat{\Omega}_{oc} = \Omega_{oc} \pm \Delta_k,$$

где  $\Delta_k$  – абсолютная погрешность измерения средства контроля.

На результат измерения заданы значения допусков в виде нижнего  $\Omega_{HK}$  и верхнего  $\Omega_{BK}$  пределов.

В общем случае при контроле возможно появление одного из четырех несовместимых случайных событий, среди которых выделим два события:

– истинное значение параметра в пределах допуска, измеренное значение за пределами контролируемого допуска, принимается неправильное решение «параметр вне допуска»;

– истинное значение параметра за пределами допуска, измеренное значение в пределах контролируемого допуска, принимается неправильное решение «параметр в допуске».

Из перечисленных выше событий первое событие будет относиться к ошибке первого рода, второе – к ошибке второго рода, при этом для определения ошибок  $\alpha$  и  $\beta$  необходимо найти совместные плотности вероятности по формулам:

$$\alpha = \int_{\Omega_H}^{\Omega_B} \int_{-\infty}^{\Omega_{HK}} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc} + \int_{\Omega_H}^{\Omega_B} \int_{\Omega_{BK}}^{\infty} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc};$$

$$\beta = \int_{-\infty}^{\Omega_H} \int_{\Omega_{HK}}^{\Omega_{BK}} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc} + \int_{\Omega_B}^{\infty} \int_{\Omega_{HK}}^{\Omega_{BK}} W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) d\hat{\Omega}_{oc} d\Omega_{oc},$$

где  $W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc})$  – двумерная совместная плотность распределения вероятностей системы случайных величин  $\Omega_{oc}$  и  $\hat{\Omega}_{oc}$ .

Если принять допущения о независимости мгновенного значения суточного хода и погрешности его измерения, то совместную плотность распределения вероятностей  $W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc})$  можно представить в виде

$$W(\Omega_{oc}, \hat{\Omega}_{oc}) = W(\Omega_{oc})W(\Omega_{oc}/\hat{\Omega}_{oc}),$$

где  $W(\Omega_{oc}/\hat{\Omega}_{oc})$  – относительная плотность распределения вероятностей.

Для определения ошибок  $\alpha$  и  $\beta$  кроме допусков на значение мгновенного суточного хода должны быть известны законы распределения вероятностей мгновенного суточного хода и погрешности средств измерения.

Экспериментальные данные и результаты их обработки подтверждают нормальность законов распределения вероятностей параметра  $\Omega_{oc}$  и погрешности измерения данного параметра  $\Delta_k$ , которые имеют математические ожидания  $M(\Omega_{oc})$ ,  $M(\Delta_k) = 0$  и среднеквадратические отклонения  $\sigma(\Omega_{oc})$ ,  $\sigma(\Delta_k)$ . С учетом оговоренных выше условий, а также считая допуск на мгновенный суточный ход симметричным, т. е.  $\Omega_B - \Omega_H = 2C$ , определяются выражения для ошибок первого и второго рода.

Определение ошибок первого и второго рода по приведенным выше формулам вызывает ряд затруднений, связанных в первую очередь с вычислением определенных интегралов и сходящихся несобственных интегралов с бесконечными пределами интегрирования, поэтому на практике для их нахождения применяют приближенные оценки, основанные на численных методах интегрирования. Согласно этим методам определенный интеграл можно представить в виде приближенного значения:

$$I(f) = \int_a^b f(x)dx \approx S(f) = \frac{b-a}{2} \sum_j^N D_j f(x_j),$$

где  $D_j$  – квадратурные коэффициенты.

Таким образом, если нахождение первообразной  $F(x)$  от заданной функции  $f(x)$  сложно или невозможно, то функцию  $f(x)$  интерполируют на отрезке  $[a, b]$  подходящим полиномом, для которого определенный интеграл вычисляется по методам (формулам) численного интегрирования. Отрезок интегрирования  $[a, b]$  разбивается на  $N$  частей, к каждой из которых применяется соответствующий квадратурный метод (формула). В данном случае был выбран метод Гаусса, машинный алгоритм реализации которого известен и хорошо апробирован [3]. Несобственные интегралы, входящие в формулы для нахождения  $\alpha$  и  $\beta$  численным методом Гаусса, заменялись соответствующими выражениями:

$$I(f) = \int_a^{\infty} f(x)dx = \int_a^{a+\delta} f(x)dx + \int_{a+\delta}^{\infty} f(x)dx ;$$

$$I(f) = \int_{-\infty}^b f(x)dx = \int_{-\infty}^{b-\delta} f(x)dx + \int_{b-\delta}^b f(x)dx .$$

Промежуточный предел интегрирования  $a + \delta$  и  $b - \delta$  выбирался из условий

$$\int_{a+\delta}^{\infty} f(x)dx < \varepsilon \text{ и } \int_{-\infty}^{b-\delta} f(x)dx < \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – заданная погрешность интегрирования.

Если ранее результаты численного интегрирования, как правило, представлялись в виде номограмм [4-5] и по ним уже определялись ошибки первого и второго рода, то в настоящее время в связи с высоким уровнем развития информационных технологий и средств компьютерной техники появилась возможность автоматизировать процесс получения оценок ошибок первого и второго рода. Так, для расчета ошибок  $\alpha$  и  $\beta$  использовалась инструментальная система Microsoft Visual Studio 2008 и язык программирования Visual Basic. Результаты численного интегрирования по методу Гаусса в виде значений  $\alpha$  и  $\beta$  отображались в соответствующем окне интерфейса компьютерной программы.

Результаты полученных вычислений  $\alpha$  и  $\beta$  при различных значениях нормированных величин  $y$  и  $z$  представлены на рис. 1 и 2 соответственно. При этом нормированные величины  $y$  и  $z$  были выбраны следующими:

$$y = \frac{C}{\sigma(\Omega_{oc})} ; z = \frac{\sigma(\Delta_k)}{\sigma(\Omega_{oc})} .$$

Графики, представленные на этих рисунках, показывают, что значения ошибок первого и второго рода зависят от нормированных величин  $z$  и  $y$ . Так, при возрастании  $y$  ошибки  $\alpha$  и  $\beta$  убывают, и изменения эти носят характер экспоненциального закона, а при возрастании  $z$  ошибки возрастают.

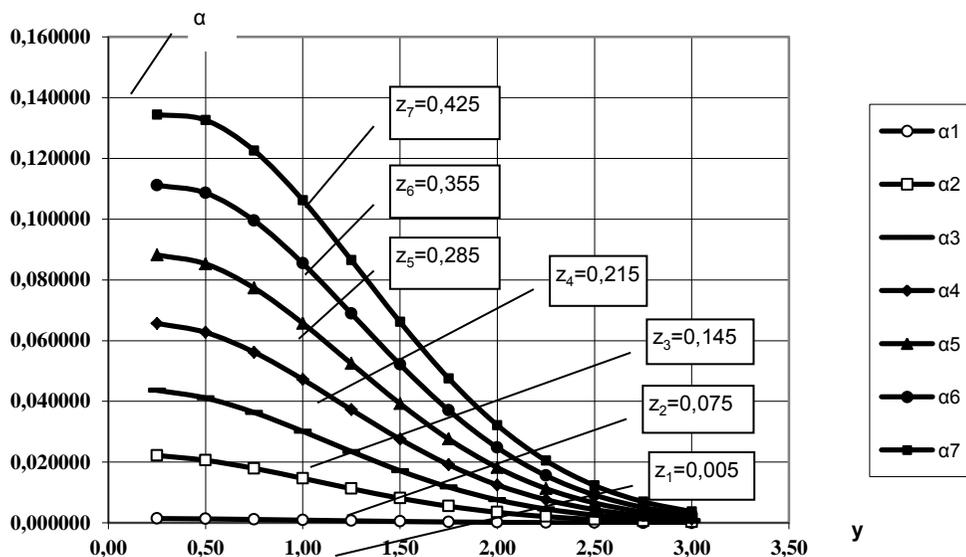


Рис. 1. Графики зависимости  $\alpha$  от  $y$  при различных значениях  $z$ .

Графики, представленные на рис. 3, показывают, что значение достоверности контроля также зависит от нормированных величин  $z$  и  $y$ . Так, при возрастании  $y$  значение достоверности контроля  $D$  возрастает, а при возрастании  $z$  – убывает.

Таким образом, абсолютная достоверность контроля и соответственно принятие правильного решения при контроле во многом зависят от погрешности средств измерений  $\Delta_k$ . Абсолютная достоверность контроля возрастает при уменьшении погрешности  $\Delta_k$  и убывает при увеличении  $\Delta_k$ .

Полученные результаты позволяют методически более правильно подойти к анализу процессов измерения и контроля не только в области хронометрии, но и в целом в практике измерения и контроля физических величин.

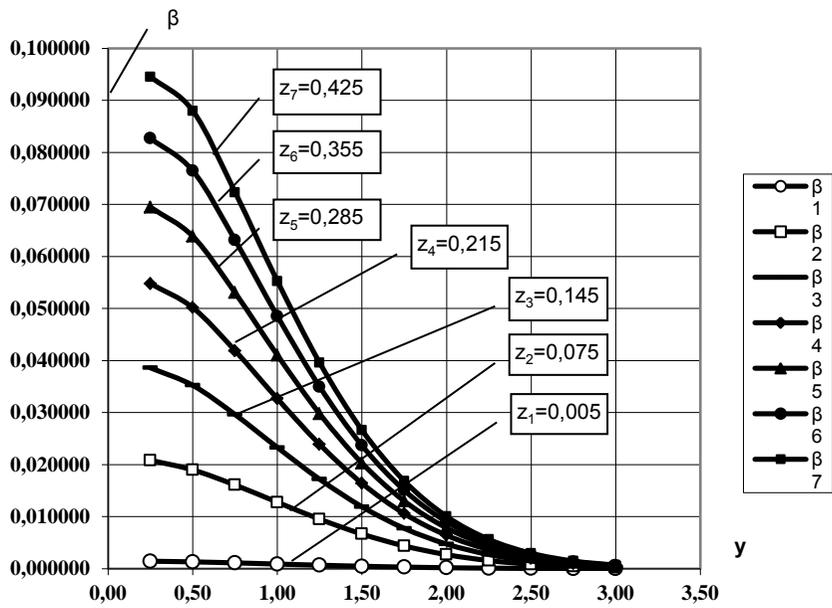


Рис. 2. Графики зависимости  $\beta$  от  $y$  при различных значениях  $z$

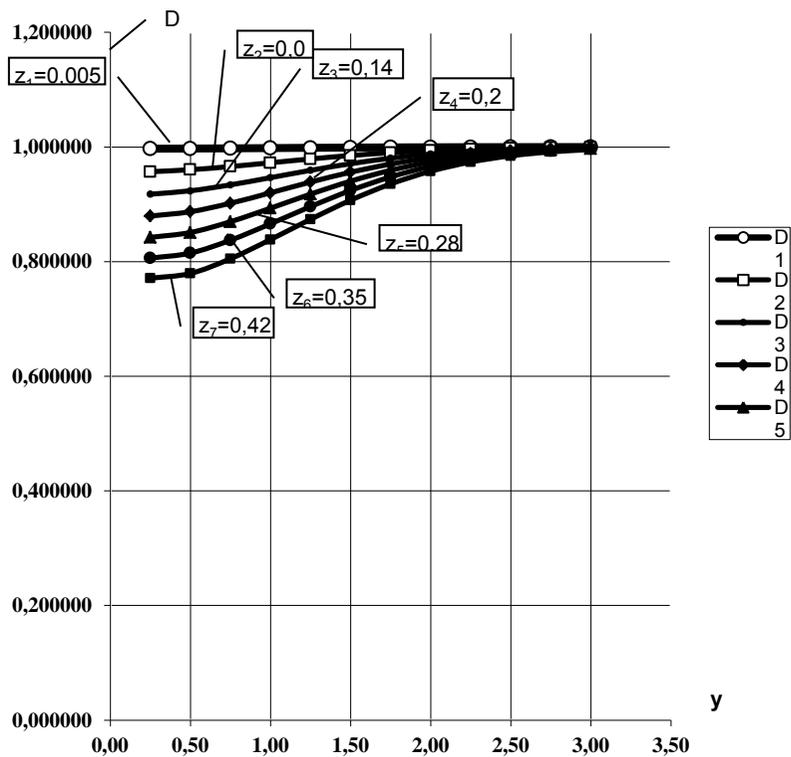


Рис. 3. Графики зависимости  $D$  от  $y$  при различных значениях  $z$

В заключение необходимо отметить, что условиях современного производства ТСХ процессы измерения и контроля связаны между собой, образуя единую систему оценки их качества. Как и в любой системе, в системе оценки качества ТСХ могут возникать внутренние противоречия, которые выходят за рамки чисто технических проблем. Повышение точности измерений средства контроля ТСХ приводит к повышению и достоверности контроля, а это означает, что при низком качестве ТСХ к значительной их отбраковке. В ряде случаев это невыгодно предприятиям, занимающимся производством ТСХ, а значит, невыгодно и использовать современные средства измерений и контроля, которые в этом случае подтверждают низкое качество выпускаемой продукции. Таким образом, возникающий при этом вопрос, существует ли предел уменьшения погрешности измерения средства контроля, не является чисто техническим, а зависит и от рыночных отношений, складывающихся в конкретном секторе экономики.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пацин Н.И., Чернягин Б.М.* Технические средства испытаний и оперативная оценка качества наручных часов при ускоренном выборочном контроле // Труды НИИчаспрома. – 1970. – Вып. 2(5). – С. 17-26.
2. *Яшин В.Н.* Применение информационных технологий для анализа математических моделей процессов эволюции погрешностей технических средств хронометрии // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IX Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 2. Моделирование и оптимизация динамических систем и систем с распределенными параметрами. Информационные технологии в математическом моделировании. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 152-160.
3. *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 240 с.
4. *Орнатский П.П.* Теоретические основы информационно-измерительной техники. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1983. – 455 с.
5. *Цапенко М.П.* Измерительные информационные системы: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 429 с.

*Статья поступила в редакцию 5 января 2014 г.*

## METHODOLOGICAL APPROACHES FOR MEASURING AND MONITORING THE BASIC METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF TECHNICAL TIMEKEEPING MEANS

**V.N. Yashin**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Methodological approaches for measuring and monitoring basic metrological characteristics of chronometer technical means are discussed in this paper. Difference between different approaches in measurement and control of the basic metrological characteristics of timekeeping hardware - instantaneous diurnal variation is shown. Algorithms suitable for performing a metrological evaluation of instantaneous diurnal variation measuring and determining the absolute accuracy of the diurnal variation of the instantaneous control are proposed. The obtained results allow to make a correct methodological approach for analyzing the measurement and control processes in the field of chronometry, as well as in practice of measurement and control of physical quantities.*

**Keywords:** *monitoring, measurement, information process, the metrological characteristics, technical means of timekeeping, reliability.*

---

*Vladimir N. Yashin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*