

На правах рукописи

Беринцев Алексей Валентинович

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СИГНАЛОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ И  
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения  
(электрические измерения)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ульяновск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Радиотехника, опто- и наноэлектроника»  
Ульяновского государственного технического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,  
**Сергеев Вячеслав Андреевич**

Официальные оппоненты: **Прокопенко Николай Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Донской государственной технической  
Университет, заведующий кафедрой  
«Информационные системы и  
радиотехника»

**Емельянов Григорий Александрович**  
кандидат технических наук,  
ООО «Промавтоматика»(г. Ульяновск),  
инженер-программист

Ведущая организация: **ОАО «Ульяновское конструкторское  
бюро приборостроения», г. Ульяновск**

Защита состоится «    »       **2015 г. в    часов 00** минут на заседании диссер-  
тационного совета Д 212.277.1 при Ульяновском государственном техническом  
университете, расположенном по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный  
Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государствен-  
ного технического университета. Также диссертация и автореферат размещены  
в Internet на сайте УлГТУ - [www.ulstu.ru](http://www.ulstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью,  
просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссер-  
тационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

 **Смирнов Виталий Иванович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современной измерительной технике широко применяются многоэлементные датчики, содержащие два и более однотипных чувствительных элемента (ЧЭ) и позволяющие преобразовывать различные пространственно распределенные физические величины в электрические сигналы. Такие устройства работают, как правило, в условиях помех различной природы и нестационарных тепловых режимах. ЧЭ датчиков имеют различный уровень собственных электрических шумов, спектр и уровень которых зависят от режима работы датчика и значения измеряемой физической величины; температуры ЧЭ датчиков могут существенно различаться в процессе измерения.

Одним из наиболее распространенных вариантов таких измерительных датчиков являются преобразователи с дифференциальным включением ЧЭ. Преимуществом такой схемы включения является возможность подавления внешних синфазных помех и собственных шумов ЧЭ. Дифференциальное включение ЧЭ используется в датчиках давления, в расходомерах-счетчиках автогенераторного типа, в магнитометрах, в измерителях перемещений, в радиометрах электромагнитных излучений различных диапазонов и других средствах измерения. Корреляционные и спектральные методы повышения точности определения параметров сигналов таких датчиков, развитые в работах П. В. Новицкого, Я. М. Мирского, Л. И. Волгина, А. И. Мартяшина, В. М. Шляндина, Л. А. Островского, Э. К. Шахова и др. основаны на использовании свойств симметрии включения ЧЭ и симметрии преобразуемых сигналов. Однако возможности спектральных и корреляционных методов фильтрации сигналов таких датчиков по точности при совместном действии аддитивных и мультипликативных шумов, а также синфазных и противофазных помех исследованы недостаточно. Вопросы оценки погрешностей, обусловленных нестационарными тепловыми режимами работы ЧЭ в процессе измерения, практически не рассматривались.

В связи с развитием оптоэлектроники активно разрабатываются средства измерения с преобразованием различных физических величин в параметры оптического излучения с дальнейшим их преобразованием в электрический сигнал. Наиболее активно в последние годы развиваются многоэлементные фотоэлектрические датчики: ПЗС- и КМОП-линейки и матрицы, а также позиционно-чувствительные датчики с пространственно распределенным ЧЭ. Такие преобразователи энергии оптического излучения в электрические сигналы находят широкое применение в системах технического зрения, тепловидении, оптоволоконных контрольно-измерительных системах на основе брэгговских датчиков. Пространственно распределенные ЧЭ таких датчиков также характеризуются индивидуальными оптическими и электрическими характеристиками, собственными шумами. Наиболее эффективными методами частотно-временного и энергетического анализа сигналов многоэлементных датчиков являются методы, основанные на различных модификациях преобразования Фурье и корреляционной обработки. Технологические возможности снижения собственных шумов и

разброса технологических параметров ЧЭ многоэлементных датчиков ограничены. В связи с этим требуется разработка и исследование предельных возможностей корреляционных и спектральных методов измерения слабых сигналов таких датчиков на фоне помех различной природы.

**Цель работы** – повышение точности измерения параметров слабых электрических сигналов многоэлементных и позиционно-чувствительных датчиков на фоне собственных шумов чувствительных элементов и внешних помех различного вида, включая помехи тепловой природы.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач**.

1. Анализ метрологических характеристик современных методов и средств определения параметров электрических сигналов многоэлементных датчиков в условиях помех различного вида.

2. Разработка и исследование способов повышения точности измерения частотно-временных параметров электрических сигналов двухэлементных и позиционно-чувствительных датчиков в условиях помех различного вида с применением спектральных методов и возбуждения датчиков периодическим сигналом.

3. Разработка и исследование предельных возможностей корреляционных методов по точности измерения слабых электрических сигналов многоэлементных датчиков с учетом раздельного и совместного действия мультипликативных и аддитивных шумов ЧЭ.

4. Разработка и экспериментальная апробация способов и алгоритмов определения параметров сигналов многоэлементных фотоэлектрических датчиков в условиях помех.

5. Анализ и оценка влияния тепловых режимов работы многоэлементных датчиков на точность определения параметров электрических сигналов.

**Научная новизна работы.**

1. Предложен способ повышения точности и помехоустойчивости (без снижения быстродействия) определения частоты слабых электрических сигналов дифференциальных преобразователей на фоне синфазных помех с применением преобразования Хартли.

2. Предложен способ повышения точности и предельной чувствительности определения параметров сигнала позиционно-чувствительного оптического датчика с использованием дифференциальной схемы включения и преобразования величины смещения светового пятна в разность фаз синусоидального напряжения.

3. Показано, что при определении корреляционным методом положения максимума интенсивности оптического излучения по сигналам фотоприемных ПЗС- и КМОП-линеек существует оптимальная ширина опорного сигнала, при которой погрешность определения максимума интенсивности минимальна.

4. Впервые получены оценки погрешности тепловой природы дифференциальных преобразователей, обусловленной нестационарным разогревом их ЧЭ. Показано, что указанная погрешность достигает максимума через некоторое вре-

мя после включения преобразователя, определяемое тепловыми параметрами ЧЭ.

5. Разработана методика измерения и исследована динамика сдвига изображения на КМОП-матрице, обусловленная саморазогревом КМОП-матрицы в процессе работы.

6. Разработаны способы и устройства для измерения переходных тепловых характеристик СИД в начале нагрева по сдвигу спектра излучения СИД, измеренному КМОП-линейкой или КМОП-матрицей.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Показана эффективность применения преобразования Хартли для измерения параметров слабых электрических сигналов дифференциальных датчиков в условиях синфазных помех.

2. Получены оценки предельных возможностей корреляционного метода по точности определения параметров сигналов пространственно распределенных многоэлементных датчиков, как при раздельном так и при совместном действии аддитивных и мультипликативных шумов ЧЭ фотоэлектрического многоэлементного датчика; получены оценки оптимальной ширины опорного сигнала.

3. Вклад в теорию многоэлементных измерительных преобразователей состоит также в учете погрешностей, обусловленных нестационарными тепловыми режимами ЧЭ в процессе измерения.

4. Алгоритмы обработки сигналов могут быть использованы при построении средств измерения и измерительных систем на основе дифференциальных датчиков и многоэлементных фотоприемников.

**Методы исследований.** При выполнении работы использовались методы теории погрешностей, теории радиотехнических цепей и сигналов, методы спектрального анализа, физики полупроводниковых приборов. При разработке программного обеспечения использовался язык программирования C, C++, компиляторы GCC (Linux) и Borland C++ Compiler 5.5 (Windows). Обработка результатов эксперимента и изображений осуществлялась с использованием программного пакета Octave (язык программирования высокого уровня, совместимый с Matlab) и оригинальных программ, разработанных в среде LabView.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Способ измерения частоты слабых сигналов дифференциальных преобразователей с применением преобразования Хартли, позволяющий повысить точность определения частоты на фоне синфазных помех в 5–8 раз, а помехоустойчивость – на 20 дБ (без уменьшения быстродействия), по сравнению с алгоритмом с использованием максимума энергетического спектра.

2. Применение дифференциальной схемы включения и способ преобразования сигнала позиционно-чувствительного фотоэлектрического преобразователя в разность фаз гармонического сигнала, позволяющие уменьшить погрешность измерения сдвига светового пятна на 10–15% по сравнению с известным способом преобразования сдвига в напряжение.

3. Оценки ширины опорного сигнала, при которой погрешность определения положения максимума интенсивности оптического излучения по сигналам многоэлементных фотоэлектрических приемников корреляционным методом, как при раздельном, так и совместном действии аддитивных и мультипликативных помех минимальна.

4. Выражения для оценки погрешностей тепловой природы дифференциальных преобразователей, обусловленных нестационарными тепловыми режимами работы ЧЭ, и различием их температур в процессе измерения.

5. Методика и результаты измерения сдвига изображения на рабочем поле КМОП-матрицы, обусловленного саморазогревом матрицы.

6. Способы и устройства для измерения сдвига спектра излучения светодиодов в результате саморазогрева с использованием КМОП-линейки или КМОП-матрицы и методика определения тепловых параметров светодиодов по указанному сдвигу.

#### **Степень достоверности и апробация работы.**

Достоверность подтверждается повторяемостью результатов при многократных измерениях, совпадением результатов измерений с теоретическими расчетами и результатами моделирования, практической реализацией датчиков и измерительных устройств. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на X всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности, образовании и экологии» (г. Тула, 2012 г.), 15-й региональной научной школы-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск 2012 г.), IX Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы» (г. Москва, 2013 г.), XVI Международной конференции «Опто-наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы» (г. Ульяновск, 2013 г.), XI Международной научно-технической конференции «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации» (г. Курск 2013 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (г. Самара, 2014 г.).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы в ООО «ЛОМО–прибор» (г. Санкт-Петербург) для улучшения метрологических характеристик расходомера-счетчика РС СПА-М(РС-П), в Ульяновском филиале Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук при проведении исследований по тематическому плану НИР.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 7 статей в научных журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ, 4 патента на изобретения и полезные модели, 6 статей в сборнике трудов и 6 – в сборниках трудов конференций.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные

работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 158 страниц, из них 137 страниц текста, включая 72 рисунка и 6 таблиц. Библиография включает 128 наименований на 14 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** диссертации рассмотрены структура и основные виды двухэлементных дифференциальных преобразователей (ДП), координатно-чувствительных и многоэлементных фотоэлектрических преобразователей, их основные характеристики и параметры, а также алгоритмы обработки сигнальной информации. Проведен анализ погрешностей ДП и показано, что основным источником погрешностей ДП являются синфазные шумы.

Особое внимание уделено анализу источников и природы шумов многоэлементных датчиков и путей снижения их влияния методами обработки сигнальной информации. Определены следующие факторы, которые накладывают ограничения на точность измерений: слабые уровни сигналов; вибрация фотоприемника или динамический сдвиг изображения, которые приводят к его смазыванию; абберрации объектива; дискретность (пикселизация) изображения; неравномерная чувствительность пиксела; шумы фотоприемника; погрешности, связанные с алгоритмами обработки изображения. Показано, что для повышения быстродействия при сохранении чувствительности измерения слабых нестационарных сигналов в условиях помех необходима разработка новых эффективных алгоритмов обработки сигнальной информации.

На примере волоконных брэгговских датчиков рассмотрен принцип измерения длины волны узкополосного оптического излучения дифференциальным фотоэлектрическим преобразователем и с помощью многоэлементного фотоприемника.

**Во второй главе** рассмотрены способы повышения точности и помехозащищенности различных измерительных устройств. В датчиках рассмотренных устройств использованы двухэлементные преобразователи с дифференциальным включением ЧЭ.

В качестве датчика расходомера-счетчика РС-СПА используется струйный автогенераторный элемент (САГ) содержащий два канала, между которыми происходит периодическое переключение потока измеряемой среды (рисунок 1).

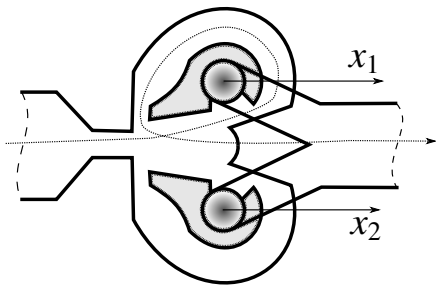


Рисунок 1 – Устройство САГ

Чем больше величина расхода, тем выше частота пульсаций давления. Для выделения сигналов пульсаций давления служат пьезоэлектрические преобразователи, расположенные внутри симметричных камер САГ. Недостатком САГ являются сильная зависимость амплитуды их выходного сигнала от величины расхода (амплитуда пульсаций давления прямо пропорциональна квадрату скорости потока). В результате чего возникают проблемы при контроле малых значений расхода. Кроме этого, на пьезоэлектрические преобразователи воздействуют пульсации давления в измеряемом трубопроводе, которые вызывают значительные синфазные помехи. Характер шума может быть импульсным (механические и гидравлические удары) и узкополосным гармоническим (механический резонанс в трубах коммуникаций).

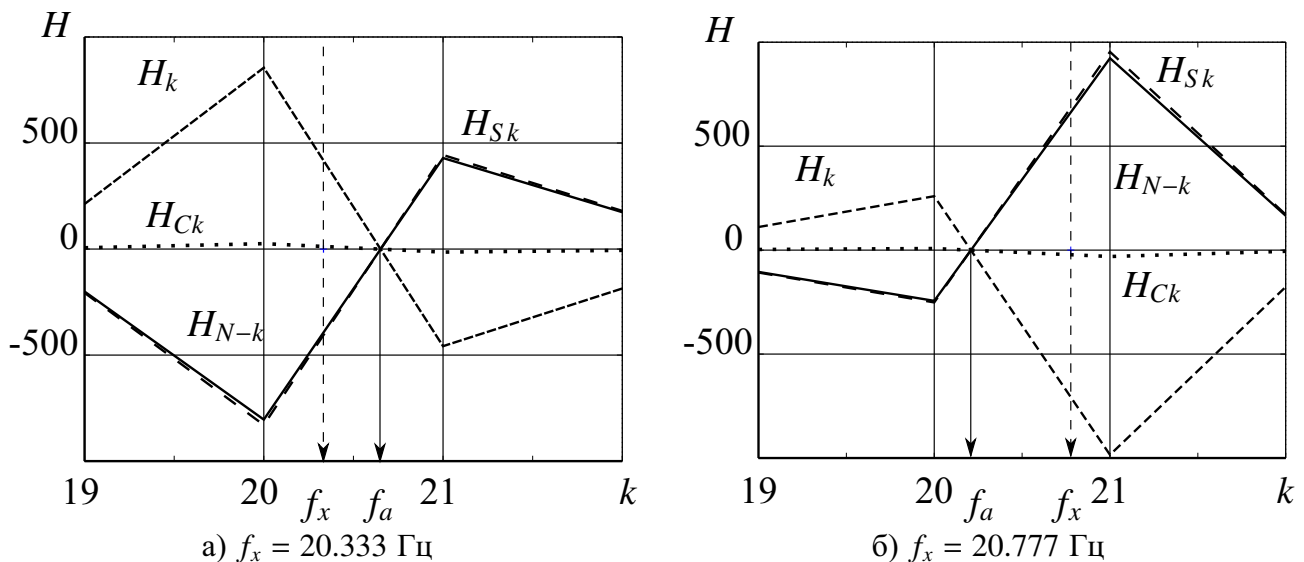


Рисунок 2 – Графики зависимостей ДПХ в окрестности измеряемой частоты

Задача повышения помехозащищенности и улучшения разрешающей способности решается за счет использования спектральных методов обработки сигналов, в частности – быстрого преобразование Хартли (БПХ). На рисунке 2 показаны значения БПХ ( $H_k$ ,  $H_{N-k}$ ), синусной ( $H_{S_k}$ ) и косинусной ( $H_{C_k}$ ) составляющих БПХ при двух значениях входной частоты:

$$H_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[ S_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right], \quad H_{S_k} = \frac{H_k - H_{N-k}}{2}, \quad H_{C_k} = \frac{H_k + H_{N-k}}{2}.$$

Из рисунка видно, что точка пересечения линии, соединяющей две разнополярные точки вблизи максимума спектра, с осью абсцисс  $f_a$  и искомое значение  $f_x$  расположены зеркально симметрично относительно точки равной половине шага дискретизации по частоте. На основании данного предположения и по результатам моделирования предложен способ определения частоты узкополосно-



го сигнала. При выполнении условий  $Hs_k \neq 0$  и  $Hs_k - Hs_{k+1} \neq 0$  значение частоты вычисляют по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \left[ k + 1 - \left( \frac{Hs_k}{Hs_k - Hs_{k+1}} \right) \right],$$

а при выполнении условий  $Hs_k = 0$  или  $Hs_k - Hs_{k+1} = 0$  – по формуле:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \left[ k + 1 - \left( \frac{Hc_k}{Hc_k - Hc_{k+1}} \right) \right].$$

Таким образом, для вычисления точного значения частоты узкополосного сигнала используется синусная составляющая БПХ во всех случаях, за исключением тех, когда для номера  $k$  она равна нулю. В этом случае используется косинусная составляющая. При этом вид формулы для вычисления точного значения частоты не изменяется. Применение данного способа позволило увеличить разрешающую способность измерения частоты в 8 раз относительно способа определения частоты по максимуму энергетического спектра.

Если рассматривать спектральный метод обработки сигнала с точки зрения помехозащищенности, то при воздействии на вход устройства широкополосных помех данный метод дает дополнительный выигрыш в отношении сигнал/шум, обратно пропорциональный ширине спектра помехи. В случае узкополосной помехи, даже с учетом ее ослабления дифференциальным усилителем, соответствующая ей спектральная составляющая может превысить значение спектральной составляющей полезного сигнала. В результате, при определении частоты колебаний путем нахождения спектральной составляющей с максимальным значением будет выделена спектральная составляющая, соответствующая сигналу помехи.

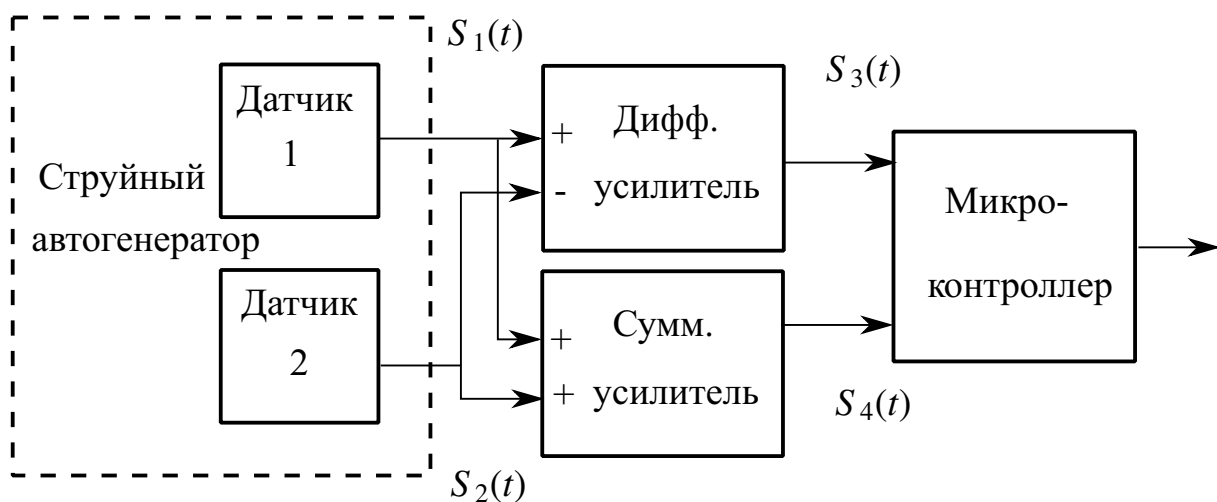


Рисунок 3 – Структурная схема устройства обработки сигналов струйного расходомера с повышенной помехозащищенностью

Для преодоления данной проблемы в устройство введен суммирующий усилитель, в котором происходит сложение сигналов с выходов датчиков (рисунок 3). При этом составляющая помехи (с учетом ее синфазности) усиливается

значительно сильнее, чем противофазная полезная составляющая. В результате выходной сигнал суммирующего усилителя  $S_4(t)$  будет представлять в основном сигнал помехи. Это позволяет получить информацию о значении частоты помехи и использовать ее при обработке сигналов.

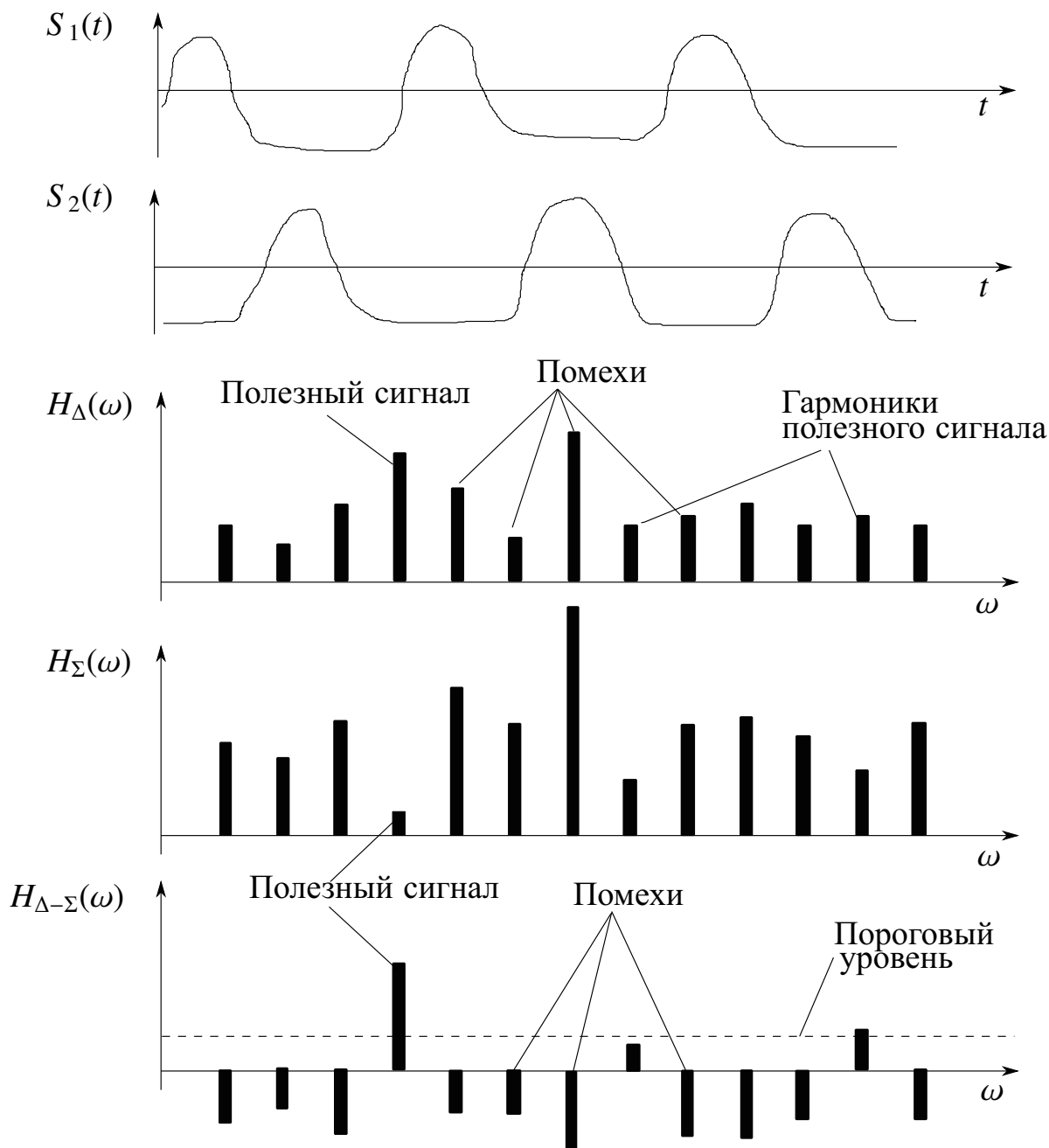


Рисунок 4 – Процесс преобразования спектров в устройстве обработки сигналов струйного расходомера

Если рассмотреть амплитудные спектры Хартли сигналов с выхода дифференциального усилителя —  $H_{\Delta}(\omega)$  и с выхода суммирующего усилителя —  $H_{\Sigma}(\omega)$ , то в спектре  $H_{\Sigma}(\omega)$  составляющие помех (за счет синфазного сложения) значительно превышают по значению спектральные составляющие полезного сигнала (рисунок 4). Это позволяет выделить и практически полностью исключить сигнал помехи. Для этого вычисляется разностный спектр  $H_{\Delta-\Sigma}(\omega)$  значений одина-

ковых спектральных составляющих в спектрах  $H_{\Delta}(\omega)$  и  $H_{\Sigma}(\omega)$ . Данная методика вычислений приводит к тому, что в спектре  $H_{\Delta-\Sigma}(\omega)$  составляющие сигнала помехи имеют отрицательное значение, а составляющие полезного сигнала ослабляются незначительно.

Значение частоты, соответствующее максимуму в спектре  $H_{D-\Sigma}(\omega)$  является выходным сигналом устройства обработки. Перед тем, как полученный результат поступает на выход устройства, производится проверка превышения значения найденного максимума над некоторым пороговым уровнем. В качестве порогового уровня выбирается максимальное значение в спектре  $H_{D-\Sigma}(\omega)$  при нулевом расходе. Если значение максимума оказывается ниже порога, то полученный результат отбрасывается.

Устройство обработки реализовано на микроконтроллере AT91SAM7S256. Вычисление амплитудных спектров сигналов проводится с использованием БПХ по 2048 точкам. Время, необходимое на одно измерение, составляет 2 с.

Введение спектральной обработки позволило повысить помехозащищенность расходомеров (примерно на 40 дБ), что обеспечивает сохранение метрологических характеристик устройства при отношении сигнала к шуму на выходе САГ порядка минус 20 дБ при минимальной разности между частотой помехи и частотой полезного сигнала равной 5 Гц для воды и 50 Гц для газа. Работоспособность устройства сохраняется при разности между частотой помехи и частотой полезного сигнала равной 1 Гц для воды и 10 Гц для газа.

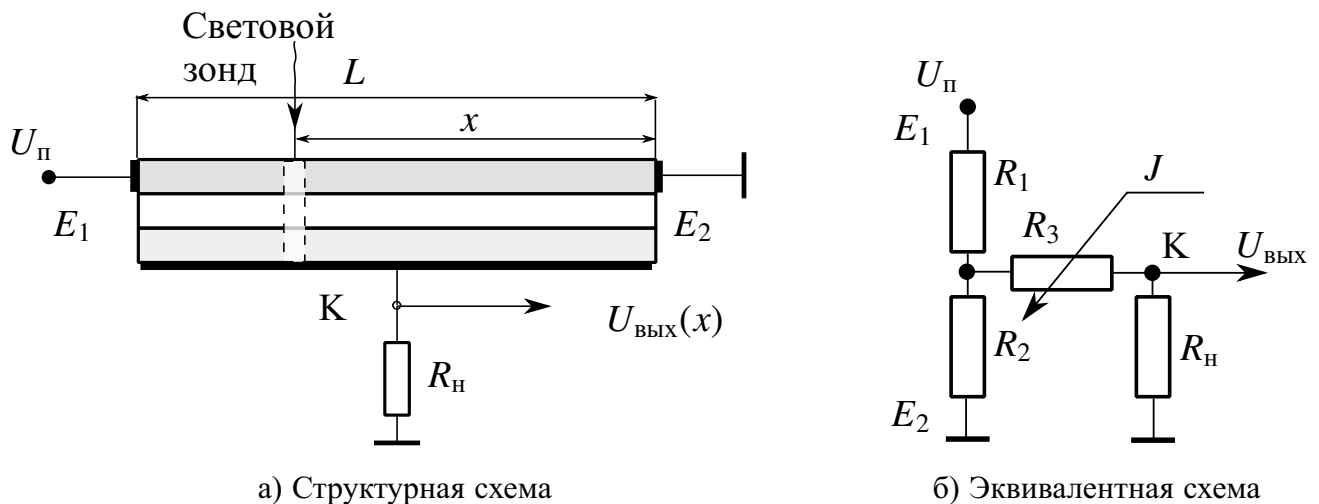


Рисунок 5 – КЧФ в режиме фотопотенциометра

Известны две типовые схемы включения координатно-чувствительного фотоприемника (КЧФ): фотопотенциометра и сканистора. В режиме фотопотенциометра (рисунок 5, а) выходное напряжение равно  $U_{\text{ВЫХ}}(x) = kU_{\text{П}}(x/L)$ , где  $U_{\text{П}}$  — постоянное напряжение, прикладываемое между первым и вторым электродами КЧФ;  $L$  — длина фоточувствительного слоя;  $x$  — координата центра светового пучка на поверхности КЧФ;  $k$  — конструктивный параметр, зависящий от геометрии КЧФ и интенсивности излучения. Эквивалентная схема включения КЧФ

в режиме фотоприемника приведена на рисунке 5, б. Сопротивление проводящего контакта  $R_3$  зависит от интенсивности светового зонда  $J$ ,  $R_1 = R(1 - \xi)$  и  $R_2 = R\xi$ ,  $\xi = x/L$  и  $R$  — сопротивление между эмиттерами, тогда выходное напряжение с учетом  $R_3$  равно:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{(1 - \xi) R_{\text{H}} U_{\text{П}}}{(\xi - \xi^2) R + R_3(J) + R_{\text{H}}}$$

Как видно существует сильная зависимость выходного напряжения от интенсивности излучения светового зонда. Изменение  $R_3$  от 0 до  $R$  приводит к изменению  $U_{\text{ВЫХ}}$  на 10% (рассмотрен случай:  $R_{\text{H}} \approx 10 \cdot R$ ,  $\xi=0,5$ ).

Существенное расширение возможностей КЧФ и улучшение его характеристик можно получить при модуляции постоянного питающего напряжения коллектора переменным или импульсным током (рисунок 6). При этом смещение максимума светового пятна, в известных устройствах определяемое по значению постоянного напряжения на выходе датчика, определяется по сдвигу фаз между выходными сигналами неуравновешенного моста. Включение КЧФ по дифференциальной схеме при модулированном напряжении источника питания позволяет снизить уровень собственных и внешних (вызванных, например, дрожанием светового луча или нестабильностью источника питания) синфазных помех, что уменьшает погрешность датчика. При этом выходной параметр (разность фаз) не зависит от уровня интенсивности светового зонда. Улучшение помехозащищенности можно получить с помощью узкополосного селективного фильтра на выходах КЧФ, настроенного на частоту модуляции.

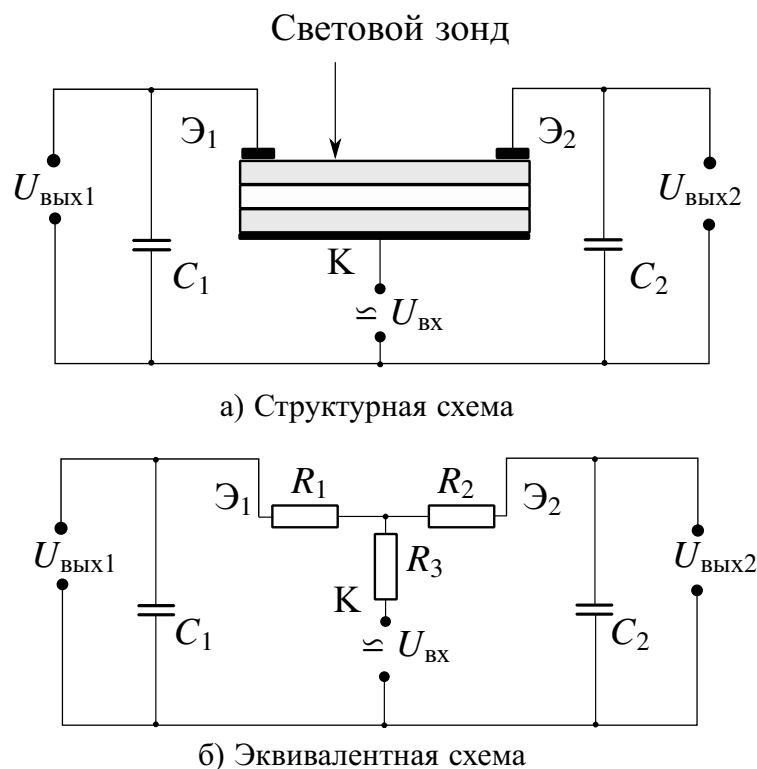


Рисунок 6 – Включение КЧФ в режиме дифференциального выходного напряжения с нагрузочными емкостями

В третьей главе представлены результаты исследования возможности применения корреляционного метода для обработки сигналов многоэлементных преобразователей при воздействии мультипликативных и аддитивных шумов.

Экспериментально исследованы характеристики электрических шумов нескольких типов многоэлементных преобразователей. Показано, что шумы ЧЭ всех исследованных образцов имеют преимущественно аддитивно-мультипликативный характер.

Проведено моделирование алгоритма корреляционной обработки для одномерного сигнала в соответствии с выражением:

$$r(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{\text{вх}}(i)u_{\text{оп}}(i + j),$$

где  $N$  — количество элементов,  $u_{\text{вх}}(i)$  — значение измеряемого полезного сигнала  $i$ -го пикселя,  $u_{\text{оп}}(i + j)$  — значение опорного сигнала, соответствующего  $i + j$  пикселу, где  $j$  — величина сдвига опорного сигнала относительно полезного. В качестве входного сигнала использована функция Гаусса

$$u_{\text{вх}}(i) = \exp\left(-\frac{(i - N/2)^2}{2w_{\text{вх}}^2}\right),$$

с аддитивным, мультипликативным и аддитивно-мультипликативным шумом. В качестве опорного сигнала  $u_{\text{оп}}(i + j)$  также использована функция Гаусса. Результаты моделирования для узкого ( $w_{\text{вх}} \ll N$ ) и широкого ( $w_{\text{вх}} \gtrsim N/10$ ) входного сигнала показаны на рисунке 7, где 1 — аддитивный, 2 — аддитивно-мультипликативный и 3 — мультипликативный шум. Моделирование показало, что опреде-

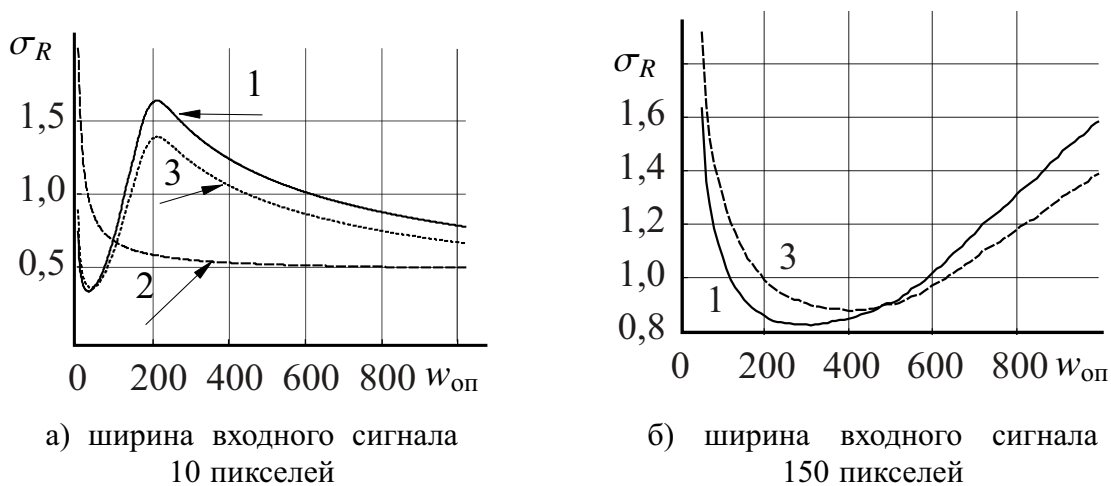


Рисунок 7 – Зависимость среднеквадратического отклонения корреляционной функции от ширины опорного сигнала. Отношение сигнал/шум равно 26 дБ

лить положение максимума изображения с минимальным среднеквадратичным отклонением можно с помощью корреляционной функции, где в качестве опорного сигнала используется функция Гаусса, ширина которого в несколько раз

больше ширины входного сигнала. Расчет показывает, что в широком диапазоне изменения соотношения сигнал/шум имеется оптимальное значение ширины опорной функции  $w_{оп} = k \cdot w_{вх}$ , где  $k$  изменяется от 1 для входного сигнала без шума, до 4 для отношения сигнал/шум  $\sim 20$  дБ. Вывод о наличии оптимального значения ширины опорной функции в широком диапазоне изменения соотношения сигнал/шум был экспериментально подтвержден. Проведено измерение параметров спектра оптического сигнала трех брэгговских датчиков с помощью ПЗС-линейки. Для всех входных сигналов (шириной около 3,5 пикселей) оптимальная ширина опорного сигнала составила 5–6 пикселей.

В четвертой главе представлены результаты разработки и экспериментальной апробации нескольких оригинальных способов и устройств для измерения сдвига спектра СИД в результате саморазогрева с помощью многоэлементных фотоприемников: ПЗС-линейки и КМОП-матрицы.

Предложены способ и устройство измерения переходной тепловой характеристики (ПТХ) СИД с помощью фотоприемной ПЗС-линейки. В основе способа лежит использование в качестве температурочувствительного параметра (ТЧП) длины волны в максимуме спектра излучения СИД, что позволяет повысить точность измерения по сравнению с известными способами измерения ПТХ с использованием в качестве ТЧП падения напряжения на р-п-переходе СИД за счет исключения электрических помех. Температурный коэффициент этой длины волны является очень стабильной и независимой от внешних факторов величиной, поскольку определяется фундаментальными свойствами полупроводников. Сущность способа состоит в том, что по мере разогрева СИД положение максимума пространственного спектра его излучения на фотоприемной линейке будет изменяться.

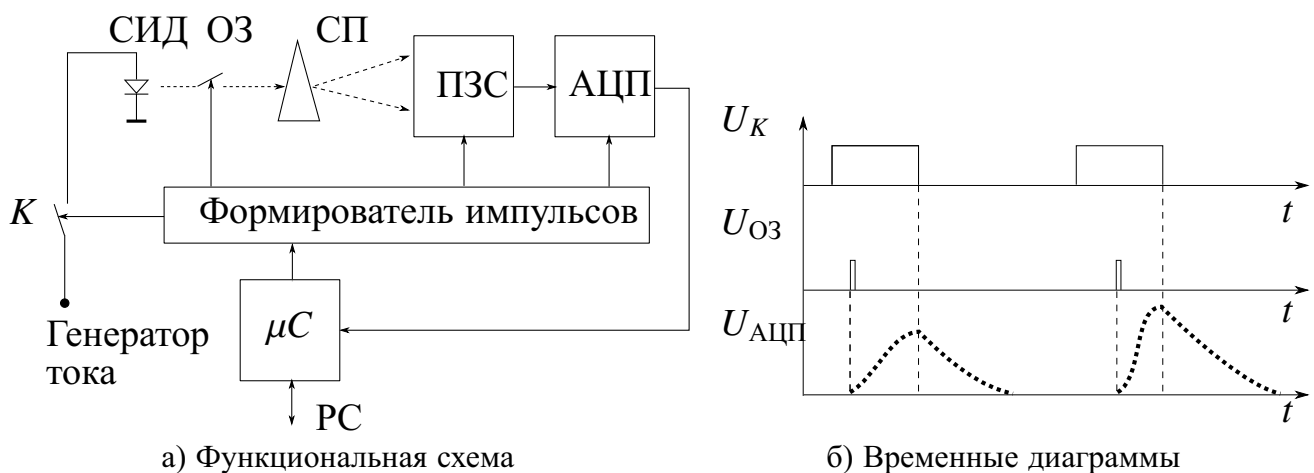


Рисунок 8 – Функциональная схема и временные диаграммы устройства измерения ПТХ с помощью ПЗС-линейки

Устройство, реализующее способ, (рисунок 8, а) содержит последовательно соединенные генератор тока, ключ (К), исследуемый СИД, электрооптический затвор (ОЗ), спектральный преобразователь (СП), многоэлементную фотоприем-

ную ПЗС-линейку и АЦП. Управление осуществляется с помощью микроконтроллера ( $\mu C$ ), соединенного с персональным компьютером (PC).

Для обеспечения измерения ПТХ на начальном участке нагрева СИД вплоть до длительностей греющего импульса тока порядка 1 мс используется стробоскопический принцип преобразования (рисунок 8, б). На СИД подается последовательность импульсов греющего тока нарастающей длительности и с паузами между импульсами длительностью, достаточной для остывания перехода СИД практически до температуры корпуса и считывания информации с многоэлементного фотоприемника. Излучение СИД, через оптический затвор, поступает на спектральный преобразователь, преобразующий оптический спектр в пространственное распределение интенсивности излучения, и далее на многоэлементный фотоприемник. Длительность засветки фотоприемника определяется временем открытого состояния электрооптического затвора.

Шаг изменения длительности греющих импульсов тока определяется необходимой точностью измерения ПТХ СИД и характерными тепловыми постоянными времени кристалла СИД ( $\sim 250\text{--}300$  мкс). На начальном участке ПТХ СИД сдвиг спектра измеряется через интервалы времени, изменяющиеся по логарифмической шкале. После того, как длительность греющего импульса тока достигнет 1 мс, на СИД подается ступенька тока и далее регистрируется спектр излучения СИД в заданные моменты времени с логарифмическим шагом в режиме непрерывного разогрева СИД, вплоть до полного прогрева всей конструкции СИД (30–40 мин).

Рассмотрен механизм считывания изображений КМОП-матрицей в режиме «бегущего» затвора и определено, что время задержки начала экспозиции каждой строки сдвинуто на фиксированное время. Данный эффект предложено использовать в качестве временной развертки при исследовании переходных процессов, если изменение исследуемого параметра отображается в изменение оптического излучения, например – спектр СИД. Для этого синхронизируется включение источника излучения с началом считывания кадра, а изображения спектральных линий располагается перпендикулярно строкам КМОП-матрицы. В результате каждый пиксель матрицы изображения содержит информацию об интенсивности излучения определенного спектрального участка в заданный момент времени.

В основу способа определения температурного сдвига спектра СИД с помощью матрицы положен алгоритм «бегущего затвора» и корреляционный метод определения положения максимума излучения. Определение температурного сдвига спектра СИД после включения (в режиме нагрева постоянным током) производится по следующему алгоритму.

- Записывается последовательность изображений. Начало записи первого кадра синхронизируется с моментом подачи на исследуемый СИД тока питания.

- Корреляционным методом находится положение максимума спектра в каждой строке  $i$ -го кадра  $\max(R_i)$  и строится зависимость  $\max(R_i(y))$  для всей

последовательности кадров ( $y$  – номер строки).

- Определяется номер кадра установившегося режима  $N$ .
- Относительный сдвиг спектра  $\Delta_x$  рассчитывается как разность

$$\Delta_x = \max[R_1(y)] - \max[R_N(y)].$$

- Определяется зависимость смещения максимума спектра от температуры в статическом режиме  $\Delta_x(T)$  для различных значений тока питания СИД.

- По полученной зависимости  $\Delta_x(T)$  строится зависимость температуры от номера строки  $T(y)$ . С учетом  $t = \tau_{shift} \cdot y$ , где  $\tau_{shift}$  – время задержки начала экспозиции строки, производится пересчет в зависимость температуры от времени  $T(t)$ .

В отличие от способа определения температурного сдвига спектра с помощью фотоприемной ПЗС-линейки, данный способ позволяет оценить динамику изменения спектральных характеристик СИД за один импульс инжекционного тока.

Схема экспериментальной установки для измерения сдвига спектра приведена на рисунке 9.

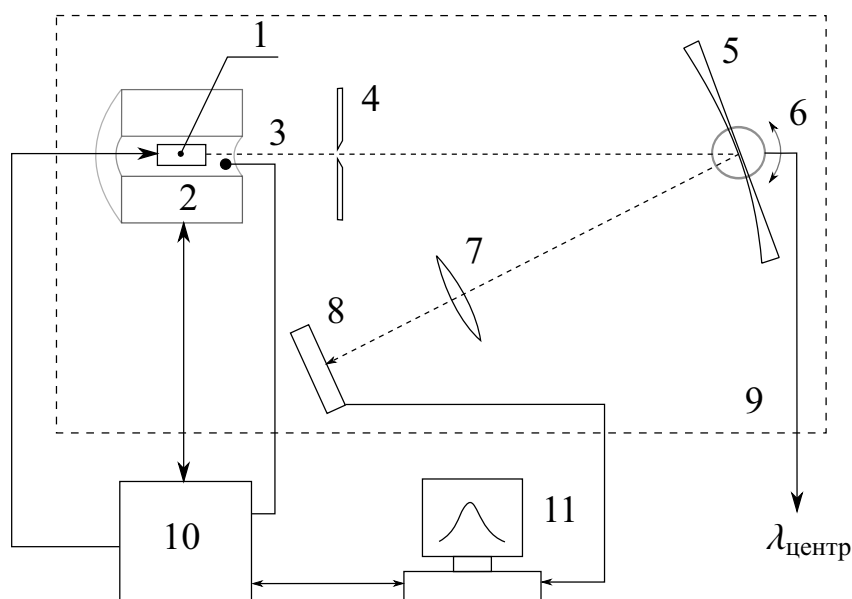


Рисунок 9 – Схема установки для измерения сдвига спектра СИД

Установка состоит из источника исследуемого излучения – СИД (1), размещенного внутри термостата (2) и подключенного к блоку управления (10). Блок управления по командам с персонального компьютера (11) задает ток или напряжение на СИД и поддерживает заданную температуру рабочей области. Температура в зоне установки СИД измеряется с помощью термопары (3). Излучение СИД через прозрачное окно поступает на входную щель (4) и далее на диспергирующую систему (5), где происходит разложение светового потока в спектр. Полученное спектральное распределение входного излучения через фокусирующую систему (7) формирует изображение на КМОП-матрице фотоприемника (8). Изображение спектра записывается и анализируется с помощью компьютера.



Для исключения внешней засветки вся оптическая система помещена в светонепроницаемый кожух (9). Положение центральной длины волны на изображении спектра устанавливается механическим поворотным устройством (6).

С персонального компьютера устанавливаются необходимый режим работы фотоприемной матрицы: время накопления, автоматический/ручной баланс белого, яркость, контрастность, цветность, насыщенность, гамма-коррекция. Блок управления выполнен на микроконтроллере STM32F100C4T6B. Передача измеренных данных в персональный компьютер и прием команд из компьютера осуществляется через USB-интерфейс.

Определение температурного сдвига спектра СИД в начале нагрева производилось для СИД FYLS-3528BURC красного свечения при различном значении инжекционного тока. Полученные изображения показаны на рисунке 10, а и 11, а.

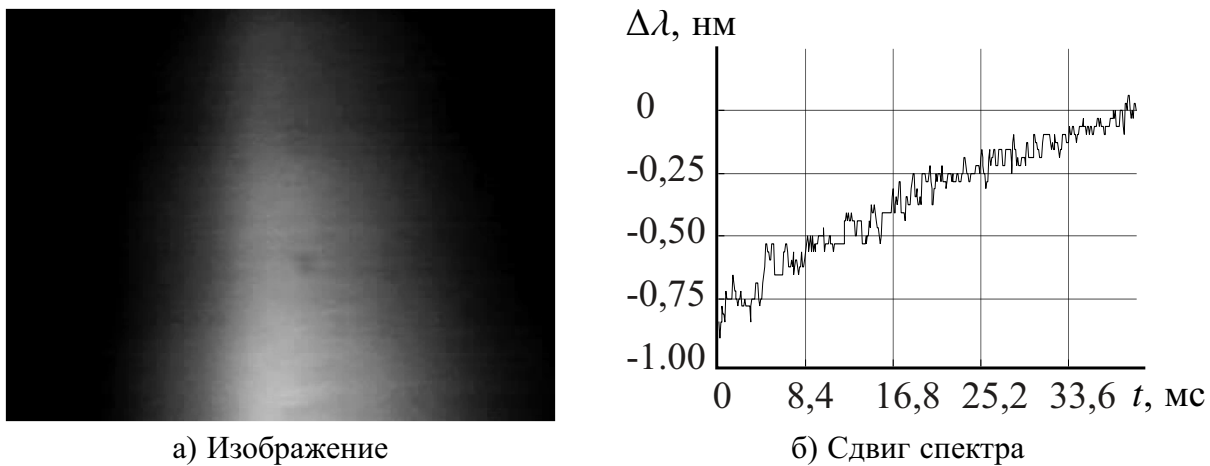


Рисунок 10 – Изображение и относительный сдвиг спектра для инжекционного тока 8,58 мА

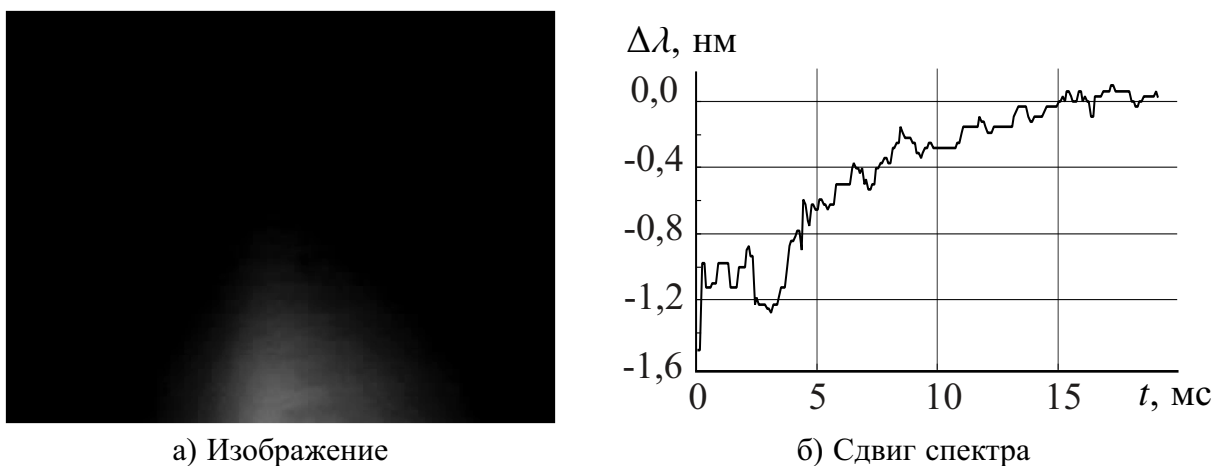


Рисунок 11 – Изображение и относительный сдвиг спектра для инжекционного тока 18,53 мА

По результатам измерения относительного сдвига спектра СИД (рисунок 10, б и 11, б) в импульсном режиме получены зависимости изменения температуры перехода СИД от времени при различных параметрах импульсного

тока. По переходным тепловым характеристикам определены тепловые параметры СИД нескольких типов. Полученные результаты совпадают с результатами измерения другими косвенными методами.

Кроме спектрального сдвига установка позволяет оценить динамику изменения интенсивности излучения и ширины спектра.

**В пятой главе** проведен анализ погрешностей тепловой природы, возникающих в многоэлементных датчиках в результате изменения температуры датчиков в процессе работы, в том числе в результате их саморазогрева поглощаемой мощностью от источника питания и источника сигнала.

Во многих вариантах преобразователей (дифференциальный усилительный каскад, мосты постоянного тока, диодные мостовые преобразователи и т. д.) полная мощность, рассеиваемая преобразователем, остается примерно постоянной  $P_1 + P_2 = P_0 \approx const$ , а мощности, рассеиваемые датчиками ( $P_1$  и  $P_2$ ), зависят только от разности температур  $\Delta T_{12} = T_1 - T_2$  датчиков:

$$P_1 = \frac{P}{2}(1 + \xi \Delta T_{12}); P_2 = \frac{P}{2}(1 - \xi \Delta T_{12}),$$

где  $\xi$  — температурный коэффициент мощности.

В приближении однозвенной теплоэлектрической модели системы из двух датчиков (рисунок 12) получено выражение для изменения разности температур датчиков при ступенчатом включении преобразователя:

$$\Delta T_{12} = \frac{P_0 \left[ R_{T1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T1}}} \right) - R_{T2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T2}}} \right) \right]}{2 \left[ 1 - \frac{\xi P_0}{2} \left( R_{T1} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T1}}} \right) + R_{T2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{T2}}} \right) \right) \right]}, \quad (1)$$

где  $\tau_{Ti} = R_{Ti} C_{Ti}$  — тепловая постоянная времени  $i$ -го датчика,  $R_{Ti}$  — тепловое сопротивление, а  $C_{Ti}$  — теплоемкость  $i$ -го датчика.

Из анализа (1) следует, что разность температур  $\tilde{T}_{12}^{max}$  будет достигать максимума в момент времени  $t_{max}$ , определяемый формулой:

$$t_{max} = \frac{\tau_{T1} \tau_{T2}}{\tau_{T1} - \tau_{T2}} \cdot \ln \frac{C_{T1}}{C_{T2}}. \quad (2)$$

Значение максимальной разности температур  $\tilde{T}_{12}^{max}$  датчиков находится путем подстановки в (1) выражения для  $t_{max}$  и может быть записано в виде:

$$\Delta \tilde{T}_{12}^{max} = \frac{\Delta T_{12}^{max}}{1 - \frac{\xi}{2} \Delta \tilde{T}(t_{max})}, \quad (3)$$

где

$$\Delta T_{12}^{max} = P_1(t)R_{T1}\left(1 - e^{-\frac{t_{max}}{\tau_{T1}}}\right) - P_2(t)R_{T2}\left(1 - e^{-\frac{t_{max}}{\tau_{T2}}}\right),$$

а  $\Delta \bar{T}(t_{max})$  — средняя температура ЧЭ в момент времени  $t_{max}$ .

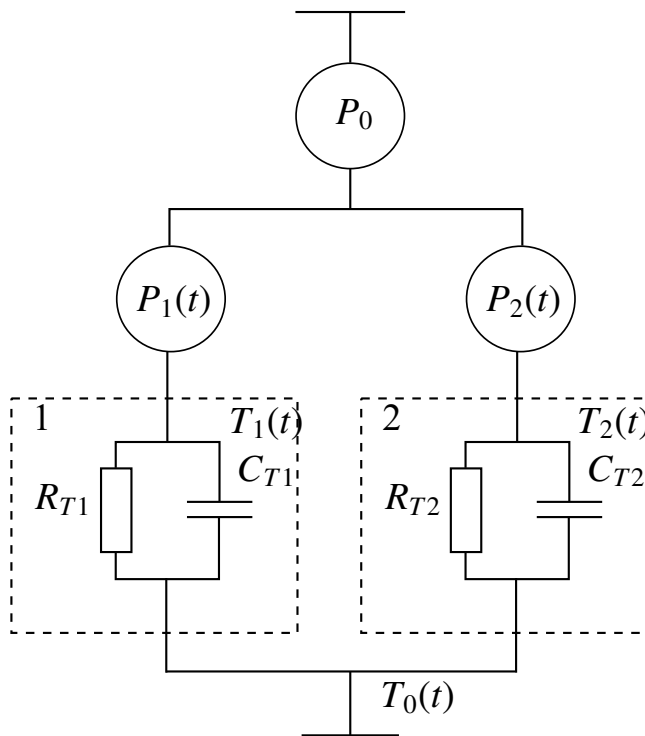


Рисунок 12 – Теплоэлектрическая модель преобразователя с дифференциально включенными датчиками

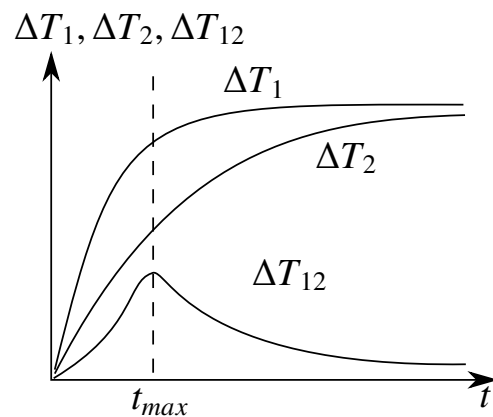


Рисунок 13 – Кинетика изменения (схематично) температуры датчиков и их разности при подаче ступеньки греющей мощности

Условие наличия максимума очевидно:  $t_{max} > 0$ . Из (2) можно видеть, что  $t_{max} = 0$  при  $C_{T1} = C_{T2}$ . Заметим (рисунок 13), что максимум разности температур в динамическом режиме может наблюдаться и при равенстве тепловых сопротивлений датчиков, то есть даже при статической погрешности, равной нулю. Следовательно, при ступенчатом включении преобразователя с различными тепловыми постоянными времени датчиков погрешность тепловой природы может существенно превышать погрешность в стационарном режиме.

Оценка погрешности тепловой природы дифференциального фотоприемника, содержащего два фотодиода (ФД), показала, что погрешность, обусловленная разогревом ФД в процессе измерения, прямо пропорциональна величине смещения светового пятна, то есть имеет чисто мультипликативный характер, и зависит от исходных размеров светового пятна. Общей рекомендацией по снижению погрешности является уменьшение размеров светового пятна, что реализуется в фотоприемных линейках.

Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что для преобразователей мостового типа температурный дрейф нуля пропорционален разности тепловых сопротивлений ЧЭ, причем, чем больше суммарное тепловое сопротивление ЧЭ, тем больше величина температурного разбаланса.

В этой главе также рассмотрено смещение центра изображения регистрируемого КМОП-матрицей в результате саморазогрева фотоприемника в процессе работы. Экспериментально показано, что разогрев матрицы приводит к смещению центра изображения, что обусловлено линейным расширением кристалла фотоприемника. Изменение приращения температуры в центре кристалла матрицы хорошо описывается выражением  $\Delta T(t) = \Delta T_m (1 - \exp(-t/\tau_T))$ , где  $\Delta T_m = R_T \bar{P}$  — максимальный перегрев в центре рабочей поверхности матрицы,  $R_T$  — тепловое сопротивление,  $\tau_T$  — тепловая постоянная времени переходной среды КМОП-матрицы (~200 с). Одностороннее смещение положения максимума спектра определяется способом закрепления фотоприемника в алюминиевом корпусе и соответствует температурному коэффициенту алюминия  $2 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ . Для выполнения прецизионных измерений необходимо либо использовать большое время экспозиции при малом времени считывания, либо предварительно вывести фотоприемник в стационарный тепловой режим, задав минимальное время экспозиции.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

1. Применение преобразования Хартли позволяет повысить точность определения частоты слабого сигнала дифференциальных датчиков на фоне синфазных помех в 5–8 раз, а помехоустойчивость на 20 дБ по сравнению с традиционным алгоритмом с использованием максимума энергетического спектра без уменьшения быстродействия.

2. Применение дифференциальной схемы включения и способа преобразования сигнала линейного позиционно-чувствительного фотоэлектрического преобразователя в разность фаз гармонического сигнала позволяет уменьшить погрешность измерения сдвига светового пятна на 10–15% по сравнению с известным способом преобразования сдвига в напряжение.

3. Проведены анализ и моделирование влияния аддитивного, мультипликативного и смешанного шума ЧЭ на погрешность корреляционного метода для нефинитных сигналов. Выявлено и экспериментально подтверждено, что при наличии шумов существует такое значение ширины опорной функции, при которой среднеквадратическое отклонение корреляционной функции минимально.

4. Разработаны способы и устройства для измерения температурного сдвига спектра СИД в начале нагрева по сигналам КМОП-линейки или КМОП-матрицы.

5. Проведен анализ погрешности тепловой природы преобразователей с дифференциальным включением ЧЭ в динамическом режиме. При ступенчатом включении преобразователя с различными тепловыми постоянными времени ЧЭ погрешность тепловой природы достигает максимума в некоторый момент вре-

мени, зависящий от отношения тепловых постоянных времени ЧЭ, и может существенно превышать погрешность в стационарном режиме.

6. Разработана методика и проведены исследования влияния собственного разогрева фотоприемника на измерения сдвига спектра. Выявлено, что наибольшее влияние на погрешность определения длины волны излучения в максимуме спектра, вызванную саморазогревом КМОП-матрицы, оказывает время экспозиции кадра.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Черторийский, А. А. Измерение частоты слабых сигналов дифференциально включенных датчиков на фоне больших синфазных помех / А. А. Черторийский, В. А. Сергеев, А. В. Беринцев // Датчики и системы. – 2011. – №9. – С. 44–47.

2. Беринцев, А. В. Исследование спектров пропускания длиннопериодных волоконных решеток под воздействием высоких температур / А. В. Беринцев, И. В. Злодеев, О. В. Иванов, С. Г. Новиков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, №4(4). – С. 1081–1085.

3. Новиков, С. Г. Полупроводниковые фотопреобразователи координат и углов с отрицательной дифференциальной проводимостью / С. Г. Новиков, Н. Т. Гурин, А. В. Беринцев и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – №3. – С. 33–36.

4. Новиков, С. Г. Активный координатно-чувствительный фотоприемник с комбинированным фотоэффектом / С. Г. Новиков, Н. Т. Гурин, А. В. Беринцев и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – №5. – С. 42–44.

5. Новиков, С. Г. Исследование распределенного координатно чувствительного фотоприемника с переменным напряжением питания / С. Г. Новиков, Н. Т. Гурин, В. А. Родионов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4. – С. 123–126.

6. Сергеев, В. А. Влияние собственного разогрева фотоприемной КМОП-матрицы на погрешность измерения параметров спектра оптического излучения / В. А. Сергеев, А. В. Беринцев, С. Г. Новиков, А. А. Черторийский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №4(3). – С. 619–623.

7. Сергеев, В. А. Оценка погрешности тепловой природы измерительных преобразователей с дифференциальным включением датчиков / В. А. Сергеев, А. В. Беринцев // Автоматизация процессов управления. – 2015. – №1. – С. 99–105.

## Патенты и авторские свидетельства

8. Черторийский, А. А. Способ определения частоты узкополосного сигнала : пат. 2442178 Российская Федерация / Черторийский А. А., Беринцев А. В.; заявл. 29.12.2009; опубл. 10.02.2011.

9. Черторийский, А. А. Струйный автогенераторный расходомер-счетчик : пат. 2422776 Российская Федерация / Черторийский А. А., Сергеев В. А., Аристов П. А. и др.; заявл. 23.03.2009; опубл. 27.06.2011.

10. Гурин, Н. Т. Координатно-чувствительный фотоприемник с комбинированным фотоэффектом : пат. 121960 Российская Федерация / Гурин Н. Т., Родионов В. А., Штанько А. А. и др.; опубл. 10.11.2012.

11. Сергеев, В. А. Способ и устройство для измерения переходных тепловых характеристик светоизлучающих диодов : пат. 2523731 Российская Федерация / Сергеев В. А., Черторийский А. А., Беринцев А. В.; заявл. 05.02.2013; опубл. 20.07.2014.

## Основные публикации в других изданиях

12. Черторийский, А. А. Устройство обработки сигналов струйного расходомера-счетчика / А. А. Черторийский, В. А. Сергеев, А. В. Беринцев // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2009. – С. 121–126.

13. Черторийский, А. А. Особенности корреляционной обработки сигналов датчиков на основе волоконно-оптических брэгговских решеток / А. А. Черторийский, В. Л. Веснин, А. В. Беринцев // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2011. – С. 193–198.

14. Злодеев, И. В. Исследование длиннопериодических решеток на основе волокна SMF-28 под воздействием высоких температур / И. В. Злодеев, О. В. Иванов, С. Г. Новиков, А. В. Беринцев // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2012. – С. 51–58.

15. Новиков, С. Г. Автоматизированный измерительный комплекс для исследования температурных зависимостей вольт-амперных и яркостных характеристик светодиодов / С. Г. Новиков, А. В. Беринцев // Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности, образовании и экологии: доклады X Всероссийской науч.-техн. конф. – Тула : ТулГУ. – 2012. – С. 30–32.

16. Новиков, С. Г. Исследование InGaN и AlGaInP светодиодов при малых токах и высоких температурах / С. Г. Новиков, А. В. Беринцев // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2012. – С. 59–65.

17. Федоров, И. С. Аппаратно-программный комплекс для исследования температурных зависимостей характеристик сверхъярких светодиодов / И. С.

Федоров, А. В. Беринцев // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: Материалы 15-й региональной научной школы-семинара. – Ульяновск : УлГТУ. – 2012. – С. 27–28.

18. Злодеев, И. В. Волоконно-оптические датчики на основе оболочечных мод / И. В. Злодеев, О. В. Иванов, С. Г. Новиков, А. В. Беринцев // VIII конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика». – Саратов : СГУ. – 2013. – С. 113-114.

19. Сергеев, В. А. Исследование влияния собственного разогрева КМОП-матрицы фотоприемника спектрофотометра на погрешность измерения сдвига спектра / В. А. Сергеев, С. Г. Новиков, А. В. Беринцев, А. А. Черторийский // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2013. – С. 165–168.

20. Новиков, С. Г. Исследование яркости SMD светодиодов при повышенных температурах в режиме стабилизации напряжения / С. Г. Новиков, А. В. Беринцев, И. С. Федоров // Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. Тезисы докладов 9-й Всероссийской конференции (13–15 июня 2013 года, Москва). – С-Пб. : ФТИ им. А.Ф. Иоффе. – 2013. – С. 162–163.

21. Новиков, С. Г. Зависимость спектральной чувствительности КМОП-матриц от температуры / С. Г. Новиков, И. С. Федоров, А. В. Беринцев // Труды XVI международной конференции. Опто- нанoeлектроника, нанотехнология и микросистемы. – Ульяновск : УлГТУ. – 2013.

22. Новиков, С. Г. Применение светодиодов в качестве температурных сенсоров / С. Г. Новиков, И. С. Федоров, А. В. Беринцев // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2013: сб. материалов XI Междунар. науч.-техн. конф. / ред. кол.: С. Г. Емельянов и др. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т. – 2013. – С. 126–128.

23. Черторийский, А. А. Оптический способ измерения деформации кольцевого упругого элемента / А. А. Черторийский, А. В. Беринцев // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов / под ред. В. А. Сергеева. – Ульяновск : УлГТУ. – 2013. – С. 86–92.

Беринцев Алексей Валентинович

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛАБЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СИГНАЛОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ И ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Автореферат

Подписано в печать 17.04.2015. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,4

Тираж 100 экз. Заказ 343.

ИПК «Венец», 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32