

На правах рукописи



КУПЦОВ Владимир Дмитриевич

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЕМНО-ПРЕОБРАЗУЮЩИЕ
УСТРОЙСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия.

Научный консультант:

Владимир Петрович Валюхов, доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ), г. Санкт-Петербург, Россия.

Официальные оппоненты:

Кривошейкин Анатолий Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехники и информационных технологий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения, г. Санкт-Петербург;

Шакин Олег Васильевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург;

Дудкин Валентин Иванович, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры «Фотоники и линий связи» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор» (АО «НИИ «Вектор»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 01 ноября 2018 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01, созданного на базе ФГАОУ ВО СПбПУ, по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, IV учебный корпус, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте университета <http://www.spbstu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.01
доктор технических наук, профессор

А.С. Коротков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования: В оптико-электронных системах одним из важнейших элементов является радиотехническое приемно-преобразующее устройство (ППУ). В ВОСПИ приемно-преобразующее устройство включает фотоприемное устройство, устройство выделения синхросигнала, декодер данных [1]. В волоконно-оптических устройствах передачи видеосигнала к радиотехническим ППУ относятся приемно-передающие модемы [2]. В случае многоканальных волоконно-оптических телевизионных систем для выделения ТВ-каналов используются фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [3]. Радиотехнические ППУ демодуляторов сенсорных фазомодулированных оптических сигналов включают фотоприемное устройство (ФПУ), усилители амплитудного и фазового модулятора и блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ) [4]. В газоанализаторах на основе эффекта проявления молекулярных ядер конденсации (МоЯК) в состав ППУ входит фотометр, блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ) [5]. В рентгено-абсорбционных сепараторах радиотехническое ППУ включает позиционно-чувствительный сцинтилляционный детектор, фотоинтегратор, блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ) [6]. В системах синхронизации источников ударных волн в сейсморазведке радиотехническое ППУ включает волоконно-оптический приемно-передающий тракт (источник, волоконный кабель, фотоприемное устройство) и устройство обработки информации.

В волоконно-оптических системах ППУ должны обеспечивать высокую чувствительность к оптическому сигналу при высоких скоростях передачи информации. В газоанализаторах, основанных на эффекте проявления молекулярных ядер конденсации (МоЯК), полезным сигналом является фототок, пропорциональный интенсивности рассеянной электромагнитной волны оптического диапазона (светорассеянию) аэрозольными частицами, получаемыми в конденсационных устройствах. В рентгено-абсорбционных сепараторах сигнал представляет собой преобразованный сцинтиллятором свет, регистрируемый фотоприёмным устройством. Во всех перечисленных и во многих других радиотехнических ППУ принципиальным является прием слабых сигналов на фоне шумов. Поэтому параметры ППУ определяют технические возможности всей оптико-электронной системы. Вместе с тем, специфические требования к параметрам ППУ определяются принципиальными особенностями функционирования оптико-электронной системы. Во многих практических случаях технические требования к параметрам ППУ не вполне удовлетворяются, что вызывает необходимость разработки научных и технических основ проектирования и конструирования ППУ.

Технические характеристики **фотоприемного устройства ППУ волоконно-оптической оптико-электронной системы** являются основными при проектировании всей системы связи [1]. Фотоприёмное устройство, входящее в состав ППУ, в волоконно-оптических линиях связи должно

обладать рядом повышенных технических характеристик: широким динамическим диапазоном, оптимальной амплитудно-частотной характеристикой, малым энергопотреблением, технологичностью при серийном производстве и т.д. Основной характеристикой является чувствительность, так как именно она непосредственно влияет на дальность передачи информации в системе при заданной мощности оптического излучения в передатчике. Фундаментальное ограничение на чувствительность ФПУ накладывают внутренние шумы входящих в его состав элементов.

Исследованию вопросов построения и расчета характеристик фотоприёмных устройств ППУ посвящены работы Персоника (Personic S.D.) [7, 8], в которых разработана методика расчёта и анализа чувствительности ФПУ, амплитудно-частотная характеристика которого имеет вид фильтра Найквиста. Исследуются варианты выбора амплитудно-частотных характеристик фотоприёмных устройств в зависимости от формы импульсов, приходящих по волоконно-оптическому кабелю различной длины, при этом форма выходных импульсов формируется в виде «приподнятого косинуса». Мурадян А.Г. и Гинзбург С.А. [9] расширили расчеты для других форм выходных импульсов, включая гауссову. В работах Крупиной В.Л. [10, 11] исследована чувствительность ФПУ при аппроксимации импульсной характеристики ФПУ гауссовой функцией. Существенный вклад в исследования фотоприёмных устройств ППУ внесли также Goell J.E. [12], Smith R.G. [13], Muoi T.V. [14], Зайцев Д.Ф. [15, 16], Шевцов Э.А., Белкин М.Е. [17].

Волоконно-оптические системы передачи видеосигнала находят применение в аппаратуре телевизионных студий и телецентров, студиях нелинейного монтажа телепрограмм, дистанционного управления технологическими процессами, передачи медицинских видеоизображений с высоким разрешением, а также в системах промышленной безопасности предприятий. Специфика применения накладывает требования, предъявляемые к ППУ волоконно-оптических систем передачи видеосигнала – студийные системы должны вносить минимальные искажения и шумы в передаваемый сигнал. В системах безопасности технические требования к уровню искажений несколько снижены по сравнению со студийными, однако повышаются требования по энергопотреблению, миниатюризации и стоимости. Специфика перечисленных требований определяет целесообразность применения цифровых методов преобразования видеосигнала для студийного оборудования и методов частотно-импульсной модуляции для систем видеонаблюдения. Достигнутые уровни (1,5÷2,0 %) нелинейных искажений сигнала яркости и цветности, а также значение отношения уровня видеосигнала к уровню флуктуационной помехи (60÷65 дБ) сегодня уже не удовлетворяют требованиям студийной аппаратуры телецентров, так что необходимо дальнейшее совершенствование ППУ волоконно-оптических систем передачи видеосигнала по этим показателям.

Для наиболее перспективного акустооптического способа управления световыми потоками

в оптических коммутационных приборах (пространственных, временных, спектральных мультиплексорах-демультиплексорах, оптических переключателях, коммутационных матрицах, циркуляторах, вентилях, модуляторах и т.п.) особую важность приобретают энергоэффективные драйверы акустооптических модуляторов на современной микроэлементной базе. Достигнутые уровни ($40 \div 50$ дБ) подавления модулирующего сигнала в интервалах нулевых значений цифровых управляющих сигналов сегодня уже не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ППУ оптических коммутационных приборов ($60 \div 70$ дБ).

Вместе с тем, как показывает анализ литературных источников, совершенствование ППУ ВОСПИ требует разработки: 1) методики расчета параметров ППУ на основе использования более полных эквивалентных шумовых схем усилительных элементов и шумов лавинных фотодиодов, 2) методики применения канонических эквивалентных шумовых схем для расчета чувствительности фотоприемных устройств ППУ с использованием выражений для коэффициента шума усилителей, 3) высококачественных волоконно-оптических ППУ передачи видеосигнала в цифровой форме и ППУ передачи видеосигналов с высокими техническими характеристиками для телевизионных применений на основе частотно-импульсной модуляции, 4) энергоэффективных высокочастотных усилителей мощности и формирователей радиоимпульсов, пригодных для применения в ППУ акустооптических коммутационных приборов.

Интеграторы фототока составляют основу оптических фотометров, входящих в состав ППУ и позволяющих прецизионно измерять чрезвычайно малые световые потоки. ППУ на основе интеграторов фототока используются в физическом эксперименте в том случае, если необходимо получить предельно достижимую чувствительность оптической измерительной системы при относительно невысоких скоростях протекания физического процесса. Актуальной проблемой создания высокочувствительных ППУ на основе интеграторов фототока является снижение порогового значения оптической мощности до уровней 10^{-15} Вт. Методика расчета чувствительности интеграторов фототока впервые предложена Черновым Е.И. [18]. Это направление получило развитие в работах Pittet P. [19]. Вместе с тем, как показывает анализ литературных источников, в оптико-электронных системах на основе ППУ с интегрированием фототока требуется разработка и совершенствование: 1) методики точного расчета чувствительности фотоинтеграторов с учетом реальных импульсных характеристик усилителей заряда и эквивалентных шумовых источников, 2) методики расчета чувствительности фотоинтеграторов с использованием фотоэлектронных умножителей.

Интеграторы фототока используются в ППУ газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК и в ППУ рентгено-абсорбционных сепараторов.

Технологические принципы метода МоЯК заключаются в превращении молекул примесей в ядра конденсации молекулярного размера, последующему двухступенчатому их укрупнению в

пересыщенных в парах специально подобранных труднолетучих органических веществ до размера $0.25 \div 0.3$ мкм и измерению рассеяния электромагнитных волн оптического диапазона (светорассеяния) на полученном аэрозоле. Принципиальное отличие газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК от других аэрозольных газоанализаторов заключается в том, что в газоанализаторе МоЯК каждая аэрозольная частица образуется из одной молекулы примеси, тогда как в других приборах требуется коагуляция нескольких молекул примеси. Следствием этого является уникальная способность регистрировать малые концентрации вредной примеси, определяемая самим конденсационным принципом метода МоЯК. Реализация столь высоких потенциальных возможностей метода МоЯК происходит в ППУ газоанализатора. Предел обнаружения целевого компонента газоанализатора, иначе именуемый чувствительностью к детектируемому веществу, во многом определяется конструкцией и техническими характеристиками ППУ газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК. Принцип проявления МоЯК задает технические требования к ППУ оптико-электронной системы газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК, сводящиеся к необходимости: 1) обеспечения высокой пороговой чувствительности фотоприемного устройства ППУ к оптическому сигналу на уровне фемто-Ватт, 2) осознанного выбора спектрального состава оптического источника облучения аэрозоля, основанного на расчете светорассеяния аэрозольными частицами и воздухом в фотометрируемом объеме на основе теории рассеяния электромагнитных волн (метод Ми), 3) создания конструкции оптической части фотометра с малыми уровнями фоновой засветки и эффективной фокусировкой рассеянного оптического излучения на фотоприемном устройстве ППУ, 4) разработки блока УРОИ, реализующего алгоритм регистрации оптического излучения в ППУ газоанализатора. Улучшение характеристик ППУ при определенных условиях приводит к улучшению параметров всей оптико-электронной системы газоанализатора.

В плане конструирования и расчета параметров фотометрических приборов, в том числе аэрозольных, представляют интерес работы Кувалдина Э.В. [20], Беляева С.П. [21], Толстой Н.В. [22]. Однако специфика ППУ газоанализаторов на основе метода МоЯК в них не рассматривается. Первые работы, рассматривающие ППУ газоанализаторов на основе метода МоЯК, были проведены Коганом Я.И. [23], Кателевским В.Я., Кянджецианом Р.А., [24]. Вместе с тем, как показывает анализ литературных источников, в оптико-электронных системах газоанализаторов на эффекте проявления МоЯК требуется разработка и совершенствование: 1) методики расчета чувствительности ППУ интегрирующего типа к детектируемым вредным веществам, 2) системы управления временем интегрирования ППУ на основе микропроцессорной техники с целью обеспечения динамического диапазона в семь порядков величины концентрации целевого компонента в пробе, 3) методики расчета рассеяния электромагнитных волн оптического

диапазона аэрозольными частицами и воздухом на основе теории рассеяния Ми.

Другим важным применением ППУ с интегрированием фототока являются **рентгено-абсорбционные сепараторы**, применяемые для извлечения особо ценных минералов (например, алмазов) в кусках руды. Используемые в настоящее время технологии извлечения природных минералов из руды (рентгенолюминесцентная и гравитационная) имеют недостатки и уже не удовлетворяют современным требованиям по целостности извлекаемых особо ценных минералов (алмазов), повышению производительности оборудования и обеспечению экологической безопасности. Преодолеть указанные недостатки позволяет применение рентгено-абсорбционной технологии, ППУ для которой рассматриваются в диссертации. Метод рентгено-абсорбционной технологии основан на регистрации прохождения электромагнитных волн рентгеновского диапазона через среду, в которой кусковая руда помещена в иммерсионную среду, имеющую коэффициент поглощения, близкий коэффициенту поглощения руды. Увеличение интенсивности излучения в местах расположения минералов (алмазов) регистрируется в ППУ рентгеновским детектором, преобразуется в фототок и обрабатывается в блоке управления, регистрации и обработки информации (УРОИ). Применение иммерсионной среды в рентгено-абсорбционной технологии позволяет выровнять по поперечному сечению конвейера уровень прошедшего через руду электромагнитного излучения рентгеновского диапазона, что существенно повышает технические характеристики рентгено-абсорбционной технологии. Высокие потенциальные возможности рентгено-абсорбционной технологии должны быть реализованы в ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора, представляющего производственное оборудование данной технологии. Принцип рентгено-абсорбционной технологии задает технические требования к ППУ оптико-электронной системы рентгено-абсорбционного сепаратора, сводящиеся к необходимости: 1) обеспечения минимального времени интегрирования фототока в ППУ, что позволяет достигать максимально высокую скорость движения конвейера с рудой, 2) обеспечения высокой чувствительности ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора, что позволяет анализировать максимальную толщину руды на конвейере, 3) осознанного выбора линейного коэффициента ослабления электромагнитного излучения рентгеновского диапазона иммерсионной среды и сцинтилляторов, 4) разработки блока УРОИ рентгено-абсорбционного сепаратора, реализующего алгоритм функционирования сепаратора. Для выполнения данных требований к ППУ необходимы новые методы расчета проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона через среды. Один из возможных методов предложен в диссертации.

Впервые ППУ рентгено-абсорбционных сепараторов предложены Новиковым В.В. Однако в экспериментальных установках автора использовалась жидкая иммерсионная среда, содержащая многочисленные пузыри воздуха, которые ошибочно воспринимались как минералы. Методы расчета ослабления электромагнитных волн рентгеновского диапазона в средах исследовались

Маренковым О.С. [25], однако предложенные аппроксимации массовых коэффициентов ослабления значительно расходятся с экспериментальными данными.

Вместе с тем, как показывает анализ литературных источников, при конструировании ППУ оптико-электронных систем рентгено-абсорбционных сепараторов требуется обеспечивать оптимальное соотношение между чувствительностью (а значит, и толщиной руды) и быстродействием ППУ (а значит, и скоростью движения конвейера) с целью достижения максимальной производительности сепаратора. Для этого требуются разработка: 1) методики расчета чувствительности фотоприемного устройства ППУ, обеспечивающей максимальную толщину слоя руды в рентгено-абсорбционном сепараторе, 2) системы управления ППУ на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с целью достижения максимальной скорости анализа руды на предмет наличия в ней полезных минералов, 3) методики аппроксимации массовых коэффициентов ослабления электромагнитных волн рентгеновского диапазона веществами и элементами.

Акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах широко используются в радиотехнических устройствах, в том числе в ППУ оптико-электронных систем. Фильтры на ПАВ обладают высокой селективностью и поэтому могут использоваться в ППУ многоканальных оптико-электронных систем, например, в волоконно-оптических системах передачи видеосигналов студийного качества в телевидении. Впервые шумовые свойства акустоэлектронных приборов на поверхностных акустических волнах исследовались в СПбПУ (Усов В.С. [А16]) в 1988 году. Работы по этому направлению другим исследователем (Paul T.M. Zeijl [26]) были опубликованы только в 1992 году. Как показывает анализ литературных данных, в оптико-электронных системах, использующих акустоэлектронные устройства, требуется разработка и совершенствование методики расчета коэффициента шума и оптимизации параметров с целью минимизации коэффициента шума ППУ с использованием приборов на поверхностных акустических волнах с учетом шумов пьезоплаты и противошумовых коррекций.

Несмотря на различие в областях применения, все рассматриваемые в настоящей диссертации ППУ **объединены общей радиотехнической методологией**, состоящей в применении эквивалентных шумовых схем усилительных и фильтрующих устройств, использованием методов оптимизации параметров ППУ для достижения заданного отношения сигнал/шум. Наличие неисследованных вопросов в теории, несовершенство практических методик расчета и недостаточная проработанность основ проектирования ППУ затрудняет конструирование оптико-электронных систем, что приводит к замедлению темпов внедрения оптико-электронных систем в народное хозяйство.

Таким образом, как показывает анализ литературных данных, несмотря на то, что существует научно-технический задел по основам физических принципов ППУ, требуют разработки и

совершенствования вопросы проектирования, конструирования и внедрения ППУ оптико-электронных систем: фотоприёмных устройств ВОСПИ и регистрации оптического излучения, сверхчувствительных газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК, рентгено-абсорбционных сепараторов, селективных трактов с использованием акустоэлектронных приборов на поверхностных акустических волнах (ПАВ), волоконно-оптических модемов передачи видеосигнала в телевидении. Основные трудности разработки методик расчета и проектирования ППУ связаны с необходимостью удовлетворения предельно высокому уровню требований, выдвигаемых новыми технологиями к ППУ оптико-электронных систем.

Из отмеченных проблем вытекают цель и основные задачи диссертационной работы, посвященной разработке научных и технических основ проектирования, конструирования и внедрения ППУ оптико-электронных систем.

Цель и задачи исследования:

Цель исследования: Комплексный подход к построению и реализации узлов управления, регистрации и обработки информации в оптико-электронных системах широкого назначения на основе общей идеологии проектирования радиотехнических приемно-преобразующих устройств этих систем.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработка методик расчета чувствительности к световому потоку фотоприемных устройств оптико-электронных систем методом эквивалентных шумовых схем.
2. Совершенствование методик расчета чувствительности фотоприемных устройств с накоплением сигнала (интеграторов фототока).
3. Разработка методики расчета рассеяния электромагнитных волн оптического диапазона аэрозольными частицами и воздухом в ППУ оптико-электронной системы газоанализатора на методе МоЯК.
4. Разработка и совершенствование устройств управления, регистрации и обработки информации приемно-преобразующих устройств с накоплением сигнала (интеграторов фототока).
5. Разработка методики расчета коэффициента шума и оптимизации параметров с целью минимизации коэффициента шума приемно-преобразующих устройств с использованием приборов на поверхностных акустических волнах с учетом шумов пьезоплаты и противозумовых коррекций.
6. Разработка методики расчета прохождения электромагнитных волн рентгеновского диапазона через среды на основе аппроксимации массовых коэффициентов ослабления от энергии рентгеновского фотона.
7. Разработка схемотехнических решений и рекомендаций по построению ППУ: 1) ВОСПИ, 2)

волоконно-оптических телевизионных модемов, 3) газоанализаторов на методе проявления МоЯК, 4) рентгено-абсорбционных сепараторов, 5) систем синхронизации источников ударных волн в сейсморазведке, 6) акустооптических модуляторов.

8. Внедрение разработанных устройств в промышленно эксплуатируемые системы.

Научная новизна:

1. Впервые разработан метод расчета чувствительности фотоприемных устройств ППУ, основанный на использовании выражений для коэффициента шума усилителя ФПУ.

2. На основе выявленной связи чувствительности фотоприемного устройства ППУ с параметрами фотодетектора и усилителя фототока впервые разработан метод оптимизации фотоприемных устройств ППУ с целью достижения высокой чувствительности и быстродействия ФПУ путем обоснованного выбора формы его амплитудно-частотной характеристики, параметров фотодетектора и усилителя фототока.

3. Впервые определены требования к параметрам фотоприемного устройства интегрирующего типа ППУ, обеспечивающим в расчетах чувствительности фотоприемного устройства ППУ интегрирующего типа на основе свертки автокорреляционной функции и импульсной реакции цепи возможность использования приближения идеального интегратора.

4. Впервые выявлен интерференционный немонотонный характер зависимости интенсивности рассеяния электромагнитных волн аэрозольными частицами в ППУ газоанализатора, основанного на эффекте проявления МоЯК, от длины волны и угла рассеяния оптического излучения. Экстремумы интенсивности рассеянного излучения определяются интерференцией волн, проридифрагировавших на сферической поверхности аэрозольной частицы, в центре которой расположена молекула определяемой примеси. Наибольшей относительной величины амплитуды экстремумов достигают в диапазоне длин волн 0,25-0,4 мкм и при углах облучения от 0 до 40°.

5. Впервые показано, что в фотометре ППУ газоанализатора на эффекте МоЯК равенство мощностей рассеянных электромагнитных волн воздухом и аэрозольными частицами достигается в ультрафиолетовой области оптического излучения при меньших углах светорассеяния, чем в видимой и инфракрасной областях.

6. Обнаружены зависимости чувствительности фотоприемного устройства ППУ газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК от параметров ФПУ и времени интегрирования, что впервые позволило улучшить чувствительность ФПУ до уровня, при котором предел чувствительности газоанализаторов на основе эффекта МоЯК к детектируемым примесям определяется спонтанной нуклеацией ядрообразования, а не предельной чувствительностью ППУ оптико-электронной системы.

7. Впервые определены условия для параметров противозумовых коррекций и усилителей в

ППУ с использованием приборов на поверхностных акустических волнах, при выполнении которых ограничение на нижнюю границу динамического диапазона накладывают лишь тепловые шумы встречно-штыревого преобразователя прибора на ПАВ.

8. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований шумовых характеристик пьезокристаллических устройств на поверхностных акустических волнах впервые установлены зависимости коэффициента шума ППУ от схемотехнических параметров, включая схемы противозумовых коррекций, позволяющие проводить комплексную оптимизацию ППУ с использованием приборов на ПАВ с целью достижения минимального значения коэффициента шума и максимального динамического диапазона ППУ при минимальных нелинейных искажениях.

9. Впервые разработан метод аппроксимации энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона через среды суммой двух степенных функций, обеспечивающий наименьшую погрешность по сравнению с существующими методами аппроксимаций

10. Установлена зависимость уровня отклонений выходного сигнала ППУ рентгеноабсорбционного сепаратора от свойств иммерсионной среды, обладающей линейным коэффициентом ослабления рентгеновского излучения, равным среднему значению по всем компонентам руды с учетом их весового содержания. На основе установленной зависимости впервые показано, что применение иммерсионной среды позволяет формировать на выходе ППУ сигнал, пропорциональный геометрическому размеру минерала в руде, по уровню которого возможно проводить извлечение минерала из руды. Предложенный способ защищен патентом РФ.

11. Впервые выявлены зависимости необходимой для отклонения оптического луча мощности сигнала модулирующей частоты на выходе усилителя от схемотехнических параметров усилителей и формирователей радиоимпульсов, позволяющие улучшить энергоэффективность драйверов акустооптических модуляторов в ППУ с использованием акустооптических коммутационных приборов.

Практическая значимость работы состоит:

1. Предложенный метод эквивалентных шумовых схем позволяет повысить чувствительность фотоприемных устройств ППУ путем обоснованного выбора формы амплитудно-частотной характеристики ФПУ, параметров фотодетектора и усилителя фототока.

2. Разработанная методика расчета минимальной детектируемой девиации фазовой модуляции радиотехнических ППУ фазомодулированных оптических сигналов, характеризующей фундаментальное ограничение шумами ФПУ, позволяет осуществлять обоснованный выбор параметров ФПУ для удовлетворения техническим требованиям к радиотехническим ППУ фазомодулированным оптическим сигналам с учетом применения в оптической схеме

мультиплексирования сигналов нескольких оптических датчиков.

3. Усовершенствованный метод расчета чувствительности фотоприемного устройства ППУ с накоплением заряда на основе свертки автокорреляционной функции и импульсной характеристики цепи позволяет провести обоснованный выбор параметров фотоинтегратора с целью достижения высокой чувствительности ФПУ.

4. Разработанная методика расчета интенсивности электромагнитной волны, рассеянной аэрозольными частицами, позволяет произвести обоснованный выбор спектрального состава источника облучения аэрозольных частиц в фотометре газоанализатора на эффекте проявления МоЯК. Показано, что область длин волн оптического излучения 0,25-0,45 мкм, в которой обнаружена максимальная неравномерность интенсивности светорассеяния, предпочтительно исключать из спектрального состава источника облучения фотометра ППУ газоанализатора на МоЯК. При этом установлено, что данному критерию наилучшим образом удовлетворяют суперлюминесцентные белосветные светодиоды.

5. Предложенная методика комплексной оптимизации ППУ с использованием приборов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) позволяет осуществить осознанный выбор параметров пьезоплаты и усилителя с целью достижения минимального коэффициента шума ППУ при минимальных искажениях. На основании разработанной методики комплексной оптимизации ППУ появляется возможность конструирования многоканальных волоконно-оптических систем передачи высококачественного телевизионного сигнала с применением фильтров на ПАВ с минимальными перекрестными искажениями между каналами.

6. Предложенная методика расчета и регистрации проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона на основе аппроксимации энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления суммой двух степенных функций позволяет провести обоснованный выбор состава иммерсионных сред, определяемого компонентным составом руды и обеспечивающего минимальное отклонение выходного сигнала ППУ от среднего значения.

7. Предложенная методика регистрации проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона в кусковых рудах, пустоты в которых заполнены иммерсионной средой, позволяет рассчитывать параметры ППУ рентгено-абсорбционных сепараторов для технологий извлечения различных природных минералов из кусковых руд, а также повысить чувствительность к обнаружению минералов в более толстом слое руды.

Методы исследования: При проведении исследований в диссертационной работе использовались методы: статистического анализа случайных процессов, теории электрических цепей, теории функций комплексной переменной, расчета рассеяния и ослабления электромагнитных волн в средах, нелинейного программирования при нелинейных ограничениях. Исследования проводились с использованием программного обеспечения и лабораторных установок,

разработанных автором.

Реализация и внедрение результатов работы: Теоретические и прикладные результаты диссертации внедрены:

- при проведении исследований по научным-техническим программам Минобразования и науки РФ: «Конверсия-СЗ.1992–1993 гг.» – НИР №2991397 «Гибридные фотоприёмные модули (ФПМ) для волоконно-оптических систем передачи информации»; «Конверсия. Высокие технологии. 1994 – 1996 гг.», «Конверсия. Высокие технологии. 1996 – 1999 гг.» – НИР и ОКР № 82-1-6 «Разработка миниатюрных гибридно-плёночных приёмно-передающих трактов волоконно-оптических систем передачи информации»; ИНТП «Прецизионные технологии и системы» (1999 г.) – НИР № 1107-99 «Разработка и выпуск опытной партии сверхчувствительных приборов для обнаружения и определения концентрации высокотоксичных химических и взрывчатых веществ в окружающей среде»; ИНТП «Трансферные технологии, комплексы и оборудование» (1997 – 1998 гг.) – НИР «Разработка и выпуск опытной партии миниатюрных телевизионных волоконно-оптических модемов для дуплексной высококачественной передачи полного цветового сигнала со звуковым сопровождением для видеоконференцсвязи» под шифром «Модем-2»;
- при проведении ряда научно-исследовательских работ в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого (Санкт-Петербург), выполненных в период с 1985 по 2017 г.г. по Договорам с НПО «Авангард» (Санкт-Петербург), НПО «Красная Заря» (Санкт-Петербург), НПО «Волна» (Москва), МГП «РОТЕК» (Москва), АОЗТ «Интеллект-Технология» (Санкт-Петербург), ЗАО «Фобос» (Москва), ЭНПО «Неорганика» (Электросталь);
- при разработке радиотехнических ППУ в рамках проекта Международного научно-технического центра (МНТЦ) №3676 «Разработка и создание автоматических высокочувствительных газоанализаторов на основе эффекта молекулярных ядер конденсации для обнаружения опасных веществ» (2008 – 2010 гг.);
- при проведении исследований по проекту №1909-К от 21.03.2018 «Исследование и разработка алгоритмов обработки сигналов, в том числе сигналов глобальных спутниковых навигационных систем»;
- при проведении исследований по проекту «Исследование характеристик квантового датчика вращения на основе методов математического моделирования с использованием гибридной суперкомпьютерной платформы и верификацией экспериментом», выполненного при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы (соглашение № 14.578.21.0211, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57816X0211)»

- в учебном процессе по дисциплинам «Электронные средства связи», «Основы радиофизики», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Теория электрических цепей», «Экспериментальные методы исследований», изучаемым в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, а также при выполнении бакалаврами и магистрантами СПбПУ выпускных квалификационных работ.

Технические решения, основанные на методиках Главы 2 диссертации, послужили основой для создания и внедрения в аппаратуру целого класса миниатюрных фотоприёмных модулей ФПУ-01, ФПУ-02, ФПМ-НЧ, ФПМ-ВЧ, ФПМ-НЧМ, ФПМ-ВЧМ, ФПМ-АРУ, ФПМ-СМ1, ФПМ-СМ2, ФПМ-СМ1-О, ФПМ-СМ2-О. На основе предложенных методик, с использованием технических решений, защищенных авторскими свидетельствами № 1411918, 1644409, 1635246, 1437961, разработана и внедрена гибридно-пленочная интегральная микросхема быстродействующего акустооптического ответвителя и спектрально-селективного переключателя (ГИСУ АОМ). Разработанные малогабаритные фотоприёмные модули нашли широкое применение в аппаратуре волоконно-оптических систем передачи информации. Аппаратурой с применением фотоприёмных модулей ФПМ-ВЧ, ФПМ-ВЧМ, ФПМ-АРУ АО НПП «Ротек» (г. Москва) в 1990÷1992 гг. были оснащены Всероссийская государственная телерадиокомпания (ВГТРК), Общественное Российское телевидение (ОРТ) г. Москва, республиканский радиотелецентр Гостелерадио республики Беларусь г. Минск, телецентры республик Киргизстан г. Бишкек и Таджикистан г. Душанбе, республиканский телецентр республики Северная Осетия г. Владикавказ, всего более 200 республиканских и региональных телецентров. Фотоприёмные модули были использованы на локальных линиях СП «Астелит» (Россия-Италия), СП «Макомнет» (Россия-США) между Москвой и пригородами для подачи сигналов к спутниковым системам связи (видео и телефонная связь). Аппаратурой с применением фотоприёмных модулей ФПМ-НЧ и ФПМ-ВЧ ЗАО «Фобос-3» г. Москва были оснащены волоконно-оптические линии связи для периферийных устройств на объектах опытного района в интересах Управления связи Стратегических войск Российской Федерации. Система связи внедрена в Федеральную пограничную службу (ФПС) и эксплуатируется с 1994 года. Фотоприёмными модулями ФПМ-СМ-О этим же предприятием оснащена специальная аппаратура передачи данных по открытому пространству со скоростью 20 Мбит/с в коде NRZ в пакетном режиме, причём чувствительность модуля в этих условиях составила -64 дБм (изделие «Элара-ЛФ»). Фотоприёмные устройства ФПУ-01 серийно выпускались на предприятии НПО «Авангард» с 1987 г.

Студийные волоконно-оптические модемы передачи видеосигнала в цифровой форме ВОМ-124 внедрены в Центре Междугородной Связи телевизионной студии «Телецентр на Чапыгина, 6» в Санкт-Петербурге. С использованием разработанного миниатюрного телевизионного волоконно-оптического модема создана волоконно-оптическая сеть промышленной безопасности

и управления производством на ОАО «Северсталь-метиз», входящем в холдинг «Северсталь». Сеть объединяет 40 видеокamer, 37 волоконно-оптических линий. Протяженность трасс варьируются от 200 до 1,2 км, суммарная длина волоконно-оптического кабеля ~26 км. Сеть обеспечивает бесперебойную работу в условиях высоких электромагнитных помех.

Внедрение драйверов акустооптических устройств ВОСПИ потребовало разработки схемотехнических решений и конструкций, обеспечивающих энергоэффективность устройств. Решения данной проблемы защищены авторскими свидетельствами № 1411918, 1644409, 1635246, 1437961, на основе которых выполнены акустооптический ответвитель и спектрально-селективный переключатель. Гибридно-пленочная интегральная микросхема быстродействующего драйвера АОМ имеет параметры: выходная мощность на нагрузке 50 Ом 0,9 ÷ 1,0 Вт, время включения/выключения не более 20 нс, ослабление несущей в паузах не менее 60 дБ, рабочая частота до 120 МГц.

В рамках выполнения Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» разработаны и внедрены радиотехнические ППУ автоматических газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК по определению люизита «Каскад-Г» и иприта «Каскад-5», предназначенные для санитарно-гигиенического контроля воздуха рабочей зоны объектов по уничтожению химического оружия. Применение разработанных ППУ позволило реализовать чувствительность газоанализаторов на уровне 10^{-7} мг/л, что существенно превосходит мировой уровень. В рамках выполнения проекта Международного научно-технического центра (МНТЦ) № 3676 разработаны газоанализаторы на основе эффекта проявления МоЯК на металло- и элементно-органические соединения (МОС и ЭОС). Чувствительность детектора МоЯК к этим веществам является уникальной и превосходит чувствительность лучших известных детекторов на два-три порядка, предел обнаружения составляет 0,01 предельно допустимых концентраций (ПДК). Внедрены ППУ также в: установки диагностики болезней по анализу выдыхаемого человеком воздуха, течеискатели для контроля изделий с высокими требованиями к герметичности (теплообменников ядерных реакторов, оборудования для работы с высокотоксичными веществами и т.д.), установки комплексного неразрушающего контроля средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД).

Экспериментальный образец рентгено-абсорбционного сепаратора, основанный на патенте № 2472595 РФ [А13] и включающем разработанное по предложенным в диссертации методикам ППУ на основе скинтилляционного детектора рентгеновского излучения и фотоинтегратора, проходит стадию подготовки к промышленному производству на ООО «ЭГОНТ» с целью внедрения в производственные комплексы горно-обогатительных комбинатов.

Внедрение разработанных ППУ оптико-электронных систем в народное хозяйство описано в Главе 7 и подтверждается соответствующими актами.

Степень достоверности результатов работы определяется: преемственностью с апробированными теоретическими и практическими подходами к вопросам разработки методик проектирования ППУ оптико-электронных систем; соответствием результатов расчетов чувствительности фотоприемных устройств и интеграторов фототока с чувствительностью серийно-выпускаемых и экспериментальных ФПУ, волоконно-оптических телевизионных модемов; соответствием расчетных и экспериментальных значений коэффициента шума акустоэлектронных устройств на ПАВ; удовлетворительным совпадением результатов расчета светорассеяния аэрозольными частицами и воздухом с проведенными измерениями на базовом детекторе МоЯК. Все теоретические результаты диссертации согласуются с современными научными представлениями и данными отечественных и зарубежных научных источников, а также подтверждаются их представительным обсуждением в научных изданиях и выступлениях на научных конференциях международного, всероссийского и межвузовского уровней.

Апробация результатов работы:

Результаты работы докладывались автором на **Международных** конференциях и симпозиумах, труды которых индексируются в системах цитирования Scopus и Web of Science:

1. SPIE International Symposium on Optical Engineering + Applications, part of the SPIE Optics and Photonics 2014 event, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces IV, 17-21 August 2014 in **San Diego, California, USA**,
2. SPIE Optical Sensors 2015, May 5, 2015; **Prague, Czech Republic**, 13-16 April, 2015.
3. SPIE International Conference on Optical Metrology, **Munich, Germany**, 21-25 June 2015,
4. IEEE 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), **Tomsk, Russia**, May 20-22, 2015.
5. SPIE Optical Sensing and Detection IV, **Brussels, Belgium**, 3-7 April, 2016
6. 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), **Tours, France**, 18-21 September 2016.
7. SPIE Photonics Asia 2016, Optical Design and Testing VII, **Beijing, China**, 11-14 October, 2016.
8. 2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO), **Sevilla, Spain**, 17-19 May, 2017.

На других конференциях: всесоюзная научно-техническая конференция «Волоконно-оптические системы связи» (Киев, 1983); XIV межотраслевая конференция (Ленинград, 1983); всесоюзный научно-технический семинар «Проектирование и изготовление МЭА: проблемы и перспективы» (Москва, 1986); школа-семинар «Устройства акустоэлектроники» (ВДНХ СССР, Москва, 1988); XLII и XLIII областные научно-технические конференции по узловым проблемам радиотехники, электроники и связи ВНТОРЭС им. А.С. Попова (Ленинград, 1987, 1988); научно-техническая конференция «Акустоэлектронные устройства обработки информации на ПАВ»

(Черкассы, 1990); межрегиональная научно-техническая конференция «Элементы и узлы современной приёмной и усилительной техники» (Ужгород, 1991); II международная конференция «ISFOC'92» (Санкт-Петербург, 1992); Российская научно-техническая конференция «Инновационные наукоёмкие технологии для России» (Москва, 1995); II всероссийская научно-практическая конференция «Высшая школа России: конверсия и приоритетные технологии» (Москва, 1996); III межведомственная научно-техническая конференция «Проблемные вопросы сбора, обработки и передачи информации в сложных радиотехнических системах» (Пушкин, 1997); международная научно-техническая конференция «Лазеры в медицине» (Санкт-Петербург, 1998), II международная научная Интернет-конференция "На стыке наук. Физико-химическая серия" (Казань, 2014 года).

Разработанные и освоенные в серийном производстве микросхемы приёмно-преобразующих устройств ФПУ-01, ФПУ-02, ФПМ-НЧ, ФПМ-ВЧ, ФПМ-АРУ, ФПМ-СМ, ВК-01(010), ФПМ-32, акустооптический управляемый ответвитель, спектрально-селективный переключатель, волоконно-оптический телевизионный модем ОМ-1, лабораторная работа «Телевизионный волоконно-оптический канал связи» демонстрировались на международных, всесоюзных, всероссийских, республиканских и отраслевых выставках, в частности: на постоянно действующей выставке Министерства средств связи (Москва, 1989); на выставке I всесоюзной конференции «Оптическая обработка информации» (Ленинград, 1988); на международной выставке «Телеком-91» (Женева, 1991); на международной выставке «Всё лучшее из СССР» (Хельсинки, 1990); на международной выставке «К играм доброй воли» (Сиэтл, 1990); на международных выставках «Экспоком-91» и «Экспоком-92» (Москва, 1991, 1992); на выставке «Конверсия-93» (Москва, 1993); на выставке «Конверсия и высокие технологии-96» (Москва); на международных выставках «EDUCOM-96» и «EDUCOM-97» (Санкт-Петербург); на выставке-совещании «Вузы России – оборонно-промышленному комплексу» (Москва, 2000); на международной выставке-конгрессе «Hi-Tech-2000» «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2000); на выставке-презентации «Золотые инновации России» (Москва, 2000); на VIII международной выставке систем связи и телекоммуникаций «Норвеком-2001» (Санкт-Петербург, 2001). На 2-й международной выставке «EDUCOM-96» экспонат «Учебная установка «Волоконно-оптическая линия связи» награждён дипломом за высокий уровень экспозиции.

Разработанные в диссертации экспериментальные образцы ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора представлялись на: 1) Международной выставке и конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2008). Экспонат отмечен дипломом и награжден **золотой медалью** выставки, 2) II Международной выставке и конгрессе «Перспективные технологии XXI века» (Москва, 2008). Экспонат отмечен дипломом и награжден **золотой медалью**

выставки, 3) Петербургской технической ярмарке (Санкт-Петербург, 2008). Экспонат отмечен дипломом и награжден **серебряной медалью** выставки.

Личный вклад: Автор диссертации внес определяющий вклад в выбор тематики исследования, постановку задач конкретных работ, их планирование и осуществление. Основная часть приводимых результатов была получена автором лично, либо совместно с соавторами публикаций. Все экспериментальные исследования планировались и выполнялись лично автором, под его руководством и при непосредственном участии автора.

Публикации: Основные материалы по теме диссертации были опубликованы в 58 печатных работах, в том числе в 1 монографии, в 16 публикациях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, в 12 публикациях, индексируемых в системах цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, списка используемых сокращений, приложений и изложена на 309-ми страницах машинописного текста, включая 260 страниц основного текста со 159-ю рисунками и 10-ю таблицами, список используемых сокращений, 5 приложений, 12 актов внедрения результатов работы на 14 страницах. Список литературы содержит 191 наименование и занимает 16 страниц.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная оптимизация параметров ФПУ на основе предложенных в работе эквивалентных канонических шумовых схем усилителей с отрицательной обратной связью позволяет обеспечить высокие уровни чувствительности (до единиц пВт при скорости передачи порядка единиц Кбит/с) или скорости передачи (до единиц Гбит/с при чувствительности единиц мкВт) в ФПУ ВОСПИ.

2. Достижение высокой чувствительности (до единиц пА/ $\sqrt{\text{Гц}}$) и максимального динамического диапазона ППУ (до 100 дБ) с использованием прибора на поверхностных акустических волнах при минимальных нелинейных искажениях (не выше 1 %) обеспечивается комплексной оптимизацией параметров пьезоплаты и усилителя как единого целого. Минимизация общего уровня шума сводится к минимизации коэффициента шума приемно-усилительного тракта при ограничениях, наложение которых связано с удовлетворением характерных для данного класса устройств технических параметров. Решение поставленной задачи может быть осуществлено методом нелинейного программирования при соответствующих классу устройств нелинейных ограничениях.

3. Рассеяние электромагнитных волн оптического диапазона аэрозольными частицами в ППУ газоанализатора на основе эффекта молекулярных ядер конденсации имеет интерференционный немонотонный характер. Интенсивность рассеянного поля в направлении «вперед» значительно

(примерно в 100 раз) превышает величину интенсивности в обратном направлении и убывает с увеличением длины волны оптического излучения и угла светорассеивания. Интенсивность светорассеяния воздухом в фотометрируемом объеме газоанализатора на основе эффекта молекулярных ядер конденсации максимальна и одинакова в направлениях угла рассеяния 0° («вперед») и 180° («назад») и минимальна при углах рассеяния 90° , причем резко уменьшается ($\sim 1/\lambda^4$) с увеличением длины волны оптического излучения и по своему значению сопоставима со светорассеянием аэрозольными частицами. В ультрафиолетовой области оптического излучения равенство мощностей светорассеяния воздухом и аэрозольной частицей достигается при меньших углах светорассеяния, чем в видимой и инфракрасной области.

4. Чувствительность фотоприёмного устройства на основе интегратора фототока ППУ с усреднением тангенса угла наклона зависимости фототока от времени и результатов измерений и с использованием фотоэлектронного умножителя позволяет осуществлять калибровку газоанализатора на методе МоЯК по светорассеянию воздуха в фотометрируемом объеме камеры фотометра, а также достигать предела чувствительности газоанализаторов на методе МоЯК к определяемым примесям на уровне спонтанной нуклеации ядрообразования, а не предельной чувствительности ППУ оптико-электронной системы.

5. Отклонения выходного сигнала ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора от среднего значения при регистрации проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона, прошедшего через кусковую руду, можно снизить в 50-100 раз с помощью применения иммерсионной среды с линейным коэффициентом ослабления рентгеновского излучения, равным среднему значению по всем компонентам руды с учетом их весового содержания.

6. Предложенная аппроксимация энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления электромагнитного излучения рентгеновского диапазона суммой двух степенных функций обеспечивает относительную погрешность 1% в диапазоне энергий рентгеновских фотонов 1-150 кэВ и позволяет проводить проектирование двуэнергетических рентгеновских систем.

Краткое содержание работы:

Во введении кратко обосновывается актуальность темы диссертации, перечислены результаты работы, имеющие научную новизну, представляющие теоретическую и практическую значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту; охарактеризована достоверность полученных результатов и приведены сведения об их апробации.

В главе 1 «Существующие тенденции в создании современных приёмно-преобразующих устройств оптико-электронных систем» на основе обзора литературных источников рассматриваются вопросы проектирования и создания ППУ ВОСПИ, в том числе волоконно-оптических систем передачи высококачественного телевизионного сигнала, ППУ

газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК, ППУ рентгено-абсорбционных сепараторов; методик расчета чувствительности фотоприёмных устройств ППУ, коэффициента шума ППУ с использованием акустоэлектронных устройств на ПАВ и методик расчета проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона через среды, а также вопросы проектирования драйверов акустооптических модуляторов. Обоснован выбор темы диссертации, показана ее актуальность и охарактеризована ее разработанность. Сформулированы и обоснованы цель и задачи исследования.

В Главе 2 «Приемно-преобразующие устройства волоконно-оптических систем передачи информации» обосновывается предложенная в диссертации методика расчета чувствительности (спектральной в разделе 2.1 и интегральной в разделе 2.2) фотоприёмных устройств ППУ ВОСПИ. Показано, что коэффициент шума усилителей с любыми (общими и местными, внутрикаскадными) обратными связями приближённо равен коэффициенту шума усилителя с разорванной петлёй ОС при допущении $\xi_{21}^a \gg \xi_{21}^f$, где $\|\xi^a\|$ и $\|\xi^f\|$ – матрицы цепи прямой передачи (усилителя) и обратной связи соответственно. В зависимости от вида ОС это могут быть матрицы y , z , или h -параметров. При этом влияние обратной связи учитывается введением в усилитель дополнительных элементов $\|\xi_{11}^f\|$ на вход и $\|\xi_{22}^f\|$ – на выход эквивалентной шумовой



Рис. 1-1. Структурная схема усилителя с разорванной петлёй ОС

схемы (рис. 1-1). Предложенный способ позволяет упростить формулы и существенно уменьшить объём вычислений. Упрощённые формулы с достаточной для инженерных расчётов точностью 2-3 % отражают зависимости коэффициента шума от параметров схем в широком диапазоне

изменения. Методика может быть применена для широкополосных усилителей на любых активных элементах (биполярные и полевые транзисторы, электронные лампы).

На основе предложенной методики расчёта коэффициента шума усилителей с обратными связями обосновывается методика расчета спектральной чувствительности фотоприёмных устройств ППУ методом эквивалентных канонических шумовых схем с использованием выражений для коэффициента шума предусилителя. На рис. 2-1 $Y_s = G_s + jB_s$ – проводимость

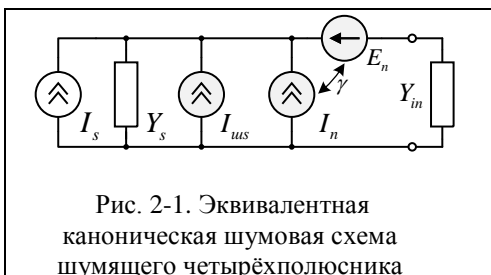


Рис. 2-1. Эквивалентная каноническая шумовая схема шумящего четырёхполюсника

источника сигнала; R_n, G_n – эквивалентные шумовые сопротивление и проводимость шумящего четырёхполюсника, шумы которого учитывают введением шумовых генераторов напряжения и тока со среднеквадратичным значениями $\overline{E_n^2} = 4kTR_n\Delta f$ и

$\overline{I_n^2} = 4kTG_n\Delta f$; $\gamma = \alpha + j\beta$ – коэффициент корреляции между шумовыми генераторами. Методика

позволяет использовать выражения для коэффициента шума усилителей, способы расчёта которого хорошо разработаны. Для трансимпедансных предусилителей ФПУ на биполярных и полевых транзисторах (BiTrTz и FETTz) разработана методика расчёта коэффициента шума для случая обобщённой ООС через известный коэффициент шума усилителя без обратной связи. Поскольку в литературе имеется обширный материал по исследованию коэффициента шума различных усилительных схем, эта методика часто оказывается предпочтительной. Получены соотношения для шумовых параметров (сопротивления R_n^f , проводимости G_n^f , корреляционных составляющих) с учётом общей отрицательной обратной связи:

$$R_n^f = R_n; \quad G_n^f = G_n + (G_f^2 + B_f^2)R_n + G_f + B_f \cdot 2\beta\sqrt{R_n G_n} + G_f \cdot 2\alpha\sqrt{R_n G_n};$$

$$(2\beta\sqrt{R_n G_n})^f = 2\beta\sqrt{R_n G_n} + 2B_f R_n; \quad (2\alpha\sqrt{R_n G_n})^f = 2\alpha\sqrt{R_n G_n} + 2G_f R_n,$$

где $Y_f = G_f + jB_f$ – проводимость трансимпеданса.

Разработанный метод эквивалентных канонических шумовых схем формализован и распространён на случаи использования в фотоприёмных устройствах ППУ усилителей на биполярных транзисторах с гетеропереходом (НВТ), псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (PHEMT), арсенид-галлиевых полевых транзисторов (GaAs FET) в микроволновом диапазоне.

Обосновывается методика расчета интегральной чувствительности ФПУ путем интегрирования в частотной области спектральной чувствительности. Комплексный коэффициент

передачи ФПУ представлен в виде $Z_{np} = \frac{Z_0}{1 + j\omega \cdot \tau - (\omega \cdot \tau)^2 m}$, имеющего смысл и размерность

комплексного сопротивления. Параметры τ – постоянная времени ФПУ и m – коэффициент автокоррекции задают форму амплитудно-частотной характеристики ФПУ. АЧХ ФПУ с большим количеством полюсов могут быть приведены к простой двухполюсной модели. Впервые при помощи теоремы о вычетах функции комплексного переменного получена зависимость

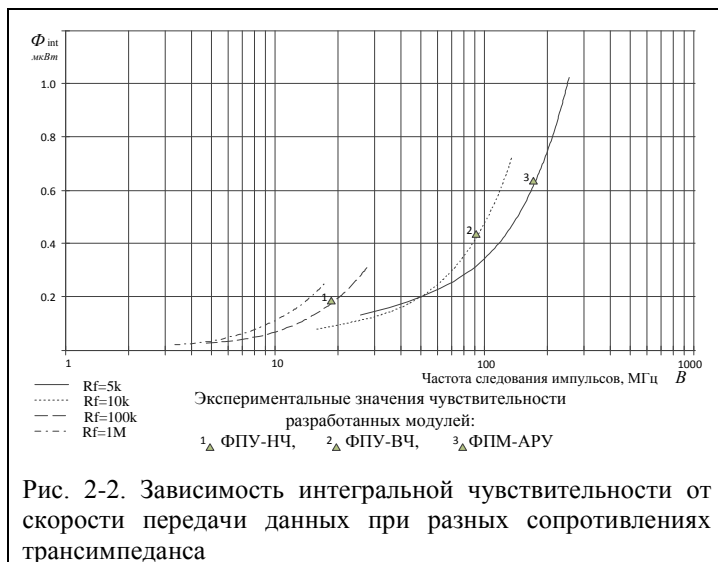


Рис. 2-2. Зависимость интегральной чувствительности от скорости передачи данных при разных сопротивлениях трансимпеданса

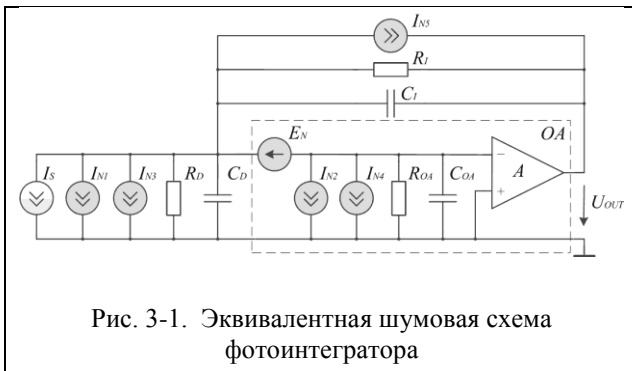
чувствительности фотоприёмного устройства ППУ от параметров АЧХ τ и m фотоприёмного устройства в простом компактном виде

$$\Phi_{pin} = \frac{SNR \sqrt{kT}}{S} \cdot \sqrt{\frac{C}{\tau} + \frac{D}{\tau^3 m}}, \quad \text{где } SNR \text{ –}$$

отношение сигнал/шум, S – токовая чувствительность фотодиода, $4kTC$ и $4kT\omega^2 D$ – частотно-независимая и частотно-зависимая компоненты спектральной плотности среднего квадрата

эквивалентного шумового тока. Полученное выражение позволяет оптимизировать параметры ФПУ с целью достижения компромиссных требований по чувствительности и быстродействию фотоприёмного устройства ППУ. Результаты теоретических расчётов чувствительности ФПУ находятся в хорошем соответствии (в пределах нескольких процентов) с экспериментальными значениями (рис. 2-2), как полученными в процессе собственных исследований автора работы, так и опубликованными другими исследователями для широкого спектра используемых в ФПУ активных элементов (биполярных и полевых транзисторов, транзисторов с гетеропереходом (НВТ), псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (РНЕМТ) и арсенид-галлиевых полевых транзисторов (GaAs FET) в микроволновом диапазоне).

В главе 3 «Радиотехнические приемно-преобразующие устройства на основе интеграторов тока» обосновывается усовершенствованная методика расчета чувствительности фотоприёмных устройств ППУ с интегрированием фототока. Задача решена в приближениях: А) реального фотоинтегратора, Б) фотоинтегратора с идеальными интегрирующим конденсатором и ключом сброса интегратора, В) идеального фотоинтегратора (бесконечная полоса пропускания усилителя). Эквивалентная шумовая схема фотоинтегратора приведена на рис. 3-1. На схеме введены



обозначения: R_D – динамическое сопротивление фотодиода, C_D – емкость $p-n$ перехода фотодиода, R_{OA}, C_{OA} – входные сопротивление и емкость операционного усилителя, C_I – емкость интегратора, R_I – сопротивление разомкнутого ключа интегратора, I_S – фототок фотодиода (ФД).

К параметрам операционного усилителя (ОУ) относятся: постоянная времени T_0 , коэффициент передачи $A = A_0 / (1 + pT_0)$, частота единичного усиления $\omega_1 = A_0 / T_0$. Эквивалентные шумовые генераторы токов $I_{N1}, I_{N2} \dots I_{N5}$ и э.д.с. e_N описывают случайные шумовые процессы и имеют спектральные плотности: I_{N1} – дробовые шумы тока фотодиода, $S_{N1} = 2qI_S$; I_{N2} – дробовые шумы входного тока ОУ, $S_{N2} = 2qI_{OA}$; I_{N3} – тепловые шумы динамического сопротивления ФД, $S_{N3} = 4kT/R_D$; I_{N4} – тепловые шумы входного сопротивления ОУ, $S_{N4} = 4kT/R_{OA}$; I_{N5} – тепловые шумы сопротивления разомкнутого ключа интегратора, $S_{N5} = 4kT/R_I$; E_N – тепловые шумы ОУ, $S_E = 4kTR_n$. Средний квадрат шумового тока на входе ОУ: $\overline{I_{N\Sigma I}^2} = S_{N\Sigma I} \cdot \Delta f$, где $S_{N\Sigma I} = S_{N1} + S_{N2} + S_{N3} + S_{N4} + S_{N5}$. Среднеквадратичное значение шумового напряжения на выходе ФПУ определяется сверткой автокорреляционной функции случайного процесса на входе и

импульсной характеристики исследуемой линейной цепи. Для «белого» шума $\overline{U_I^2} = \overline{I_{N\Sigma_I}^2} \int_0^t h_I^2(\tau) d\tau$

, где $h_I(t)$ – импульсная характеристика цепи для источников тока на входе. Изображение по Лапласу передаточной характеристики фотоинтегратора определяется двухполосной функцией

комплексной частоты $H_I(p) = \frac{R_{II}}{p^2 \tau^2 m + p\tau + 1}$, где $m = \frac{\omega_1 (C_I + C_D + C_{OA})}{R_I \cdot \left[\frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_{OA}} + \omega_1 C_I \right]^2}$,

$\tau = \frac{R_I \cdot \left[\frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_{OA}} + \omega_1 C_I \right]}{\omega_1}$. Импульсная характеристика фотоинтегратора определяется обратным

преобразованием Лапласа от передаточной характеристики: $h_I(t) = \frac{2R_I}{\tau \sqrt{1-4m}} \cdot e^{-\frac{t}{2\tau m}} \cdot sh \frac{\sqrt{1-4m}}{2\tau m}$.

Выходное напряжения интегратора тока при действии на входе скачка тока I_0 :

$U_{OUT_S}(T_{INT}) = I_0 \cdot \int_0^{T_{INT}} h_I(t) dt$. Пороговая чувствительность фотоинтегратора $P_0 = I_0/S$ (значение

мощности оптического сигнала на входе интегратора, при которой на выходе фотоинтегратора среднеквадратичное напряжение сигнала равно среднеквадратичному значению общего шума)

определяется из уравнения $U_{OUT_S}^2 = \overline{U_{N\Sigma}^2}$, где S - чувствительность фотодетектора (фотодиода) к

световому потоку, A/Bm . При выполнении условия $T_{INT} \gg \frac{C_I + C_D + C_{OA}}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_{OA}} + \omega_1 C_I}$ пороговый ток

определяется выражением: $I_0 = \frac{1}{T_{INT}} \sqrt{2q \left(I_S + I_{OA} + 2\varphi_T \left(\frac{1}{R_{OA}} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_I} \right) \right) T_{INT} + \frac{e_N^2 \omega_1 C_I (C_I + C_D)}{2}}$.

Упрощенное выражение чувствительности фотоинтегратора с использованием

фотоэлектронного умножителя (ФЭУ): $P_{0_FMP} = \frac{1}{S_A} \sqrt{\frac{2qI_{DA}\mu}{T_{INT}}}$, где μ – коэффициент внутреннего

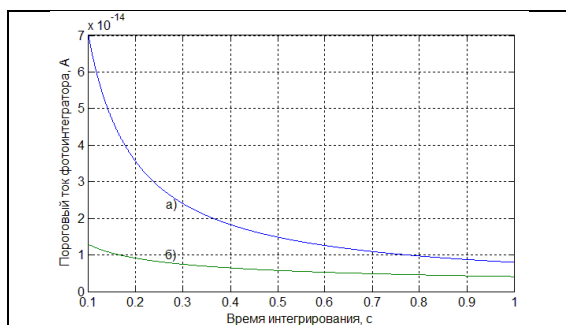


Рис. 3-2. Зависимость порогового тока ФПУ от времени интегрирования:

- а) с учетом вклада шумовой э.д.с. и
- б) без учета вклада шумовой э.д.с.

усиления лавины, S_A – крутизна преобразования, I_{DA} –

темновой анодный ток. Рассчитанное значение

пороговой чувствительности фотоприемного

устройства ППУ газоанализатора на основе эффекта

проявления Моряк при времени интегрирования 1с на

основе фотодиода составляет значение $P_{0_FD} = 0.9 \cdot 10^{-14}$

Bm , на основе ФЭУ – $P_{0_FMP} = 0.48 \cdot 10^{-15} Bm$. На рис. 3 - 2

представлена зависимость порогового тока

фотоприемного устройства ППУ газоанализатора на

основе эффекта проявления МоЯК от времени интегрирования.

Использование в составе фотоинтегратора ФЭУ совместно с прецизионным малошумящим усилителем, а также большие времена интегрирования (порядка 1 с), позволяют существенным образом упростить выражения для расчета чувствительности фотоприемного устройства ППУ газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК. Однако такая ситуация реализуется далеко не во всех случаях. Во многих практических применениях требуются позиционно-чувствительные датчики оптического излучения, что определяет использование фотодиодов. Характерное время измерения достигает долей миллисекунд и меньше. В этом случае для расчета чувствительности ФПУ должны использоваться выражения приближений А), Б). В качестве примера можно привести позиционно-чувствительный датчик проникающего рентгеновского излучения в ППУ рентгено-абсорбционных сепараторов. Время интегрирования в них определяет скорость движения конвейера с минералами и не превышает значения долей миллисекунд.

В Главе 4 «Приемно-преобразующее устройство газоанализатора на основе эффекта проявления молекулярных ядер конденсации» развит комплексный подход к решению задачи учета фундаментальных ограничений, определяемых ППУ газоанализатора, к которым относятся: а) предельная чувствительность фотоприемного устройства ППУ газоанализатора и б) рассеяние электромагнитных волн оптического диапазона (светорассеяние) аэрозольными частицами и воздухом в фотометрируемом объеме аэрозольной камеры фотометра. ППУ оптико-электронной системы газоанализатора на основе метода МоЯК включает фотометр и блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ). ППУ и конденсационные устройства (КУСТ) газоанализатора объединяются термином «детектор МоЯК».

Научно-техническая проблема конструирования фотометра ППУ газоанализатора на основе проявления МоЯК заключается в правильном выборе источника и угла освещения аэрозольных частиц в фотометрируемом объеме, определении параметров формируемых в конденсационных устройствах аэрозольных частиц (радиуса, показателя преломления и др.), достижении максимальной чувствительности ФПУ газоанализатора при быстроедействии, определяемом самим принципом проявления МоЯК. Фотометр ППУ газоанализатора выполнен по нефелометрической схеме, то есть в нем измеряется рассеянное оптическое излучение под углами, отличными от нулевого значения. В газоанализаторах, основанных на эффекте проявления МоЯК, радиусы рассеивающих частиц имеют малый разброс и составляют $r_0=0.25$ мкм, что сопоставимо с длиной волны оптического излучения. Поэтому применима теория Ми, рассматривающая рассеяние света на сферических частицах, размеры которых сравнимы с длиной световой волны λ . Теория Ми, основанная на теории электромагнитного поля, представляет собой строгое решение задачи рассеяния электромагнитных волн и не имеет ограничений на радиус рассеивающих частиц по сравнению с длиной волны оптического излучения.

Интенсивность рассеянного света имеет вид $I_s = \frac{1}{k^2 R^2} \cdot \frac{1}{2} \cdot (|S_1|^2 + |S_2|^2) \cdot I_i$, где k – волновой вектор, S_1 и S_2 – элементы амплитудной матрицы рассеяния, индекс i – определяет падающую волну, индекс s – рассеянную. Значения элементов амплитудной матрицы рассеяния S_1 и S_2 для однородного шара были рассчитаны Ми:

$$S_1 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot (a_n \pi_n + b_n \tau_n); \quad S_2 = \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} \cdot (a_n \tau_n + b_n \pi_n),$$

где a_n, b_n – коэффициенты рассеянного поля (коэффициенты Ми); π_n, τ_n – угловые коэффициенты рассеяния. Коэффициенты рассеянного поля принимают значения:

$$a_n = \frac{\mu n^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(x) [m x j_n(mx)]'}{\mu n^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'}, \quad b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu j_n(x) [m x j_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu h_n^{(1)}(x) [m x j_n(mx)]'},$$

где штрих означает дифференцирование по аргументу, стоящему в круглых скобках, а через x и m обозначены соответственно параметр дифракции $x = k r_0 = \frac{2\pi \cdot N \cdot r_0}{\lambda}$ и относительный

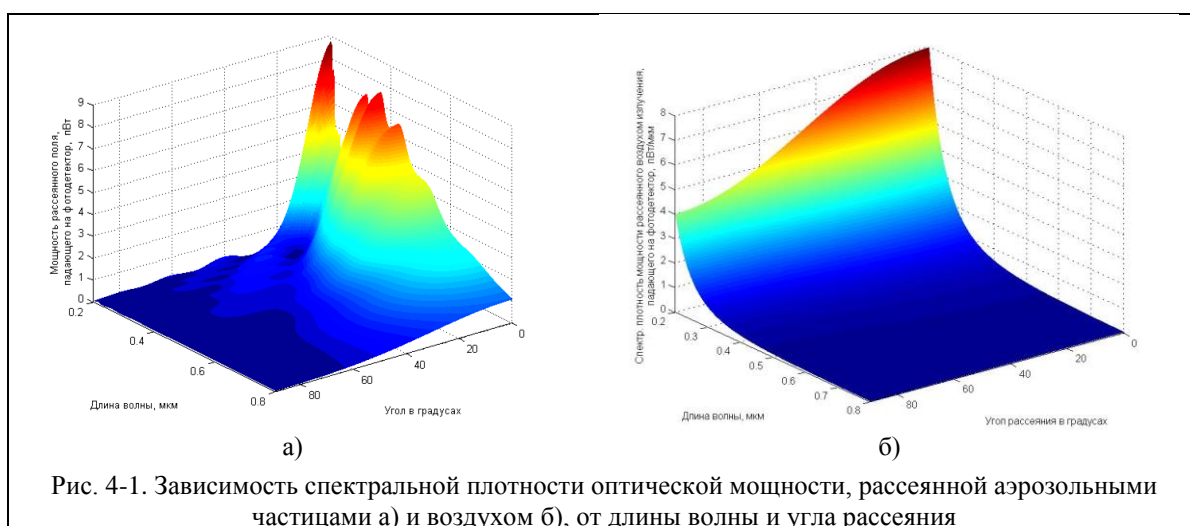
показатель преломления $m = \frac{k_1}{k} = \frac{N_1}{N}$, N_1 и N – показатели преломления частицы и среды соответственно. В выражении введены общепринятые обозначения: λ – длина волны рассеиваемого света; j_n – сферическая функция Бесселя порядка n ; $h_n^{(1)}$ – сферическая функция Ганкеля порядка n . Угловые коэффициенты рассеяния представляют собой функции $\pi_n = \frac{P_n^1}{\sin \theta}$ и

$\tau_n = \frac{dP_n^1}{d\theta}$, где P_n^1 – присоединенные функции Лежандра первого рода. Значения угловых коэффициентов рассеяния вычисляются с помощью рекуррентных формул:

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} \cdot \cos \theta \cdot \pi_{n-1} - \frac{n}{n-1} \cdot \pi_{n-2} \quad \text{и} \quad \tau_n = n \cos \theta \cdot \pi_n - (n+1) \cdot \pi_{n-1}.$$

Параметры аэрозольных частиц в ППУ газоанализатора определяются самим принципом МоЯК, расчеты светорассеяния ими было проведено впервые.

Светорассеяние воздухом в фотометрируемом объеме представляет собой паразитную фоновую засветку, поэтому важно представлять количественное соотношение светорассеяний одной аэрозольной частицей и воздухом. Расчет светорассеяния воздухом основан на теории Релея, для применимости которой размеры рассеивающих объектов (в данном случае молекул воздуха) должны быть много меньше длины волны падающего электромагнитного излучения.



Зависимость спектральной плотности мощности, рассеянной аэрозольными частицами а) и воздухом б) электромагнитной волны, падающей на фотодетектор ППУ, от длины волны и угла рассеяния представлена на рис. 4-1. На рис. 4-2 приведена зависимость угла рассеяния, при



котором спектральная плотность мощности рассеянного излучения воздухом и аэрозольной частицей равны, от длины волны оптического излучения. Наилучшие результаты по чувствительности газоанализатора на МоЯК к детектируемым веществам достигаются при использовании в фотометре яркого белосветного суперлюминесцентного светодиода. Спектральная характеристика таких светодиодов имеет ярко выраженный

максимум в области излучения сине-фиолетового цвета. Проведенное сравнение показало также, что светорассеяние одной аэрозольной частицей, в центре которой находится молекула детектируемой примеси, в 10^{15} раз превышает светорассеяние самой молекулы детектируемой примеси.

К оптико-электронным параметрам детектора МоЯК, определяющим предельную способность газоанализатора к определению концентрации детектируемых веществ, относятся чувствительность фотоприёмного устройства нефелометра, светорассеяние воздухом в фотометрируемом объеме и светорассеяние одной аэрозольной частицей, в центре которой находится молекула вредного детектируемого вещества. Темновой фототок, светорассеяние воздухом и аэрозольными частицами измерены на базовом детекторе МоЯК, подробно описанном в разделе 4.6 диссертации. Результаты расчетов и экспериментальных измерений сведены в Таблицу 4-1:

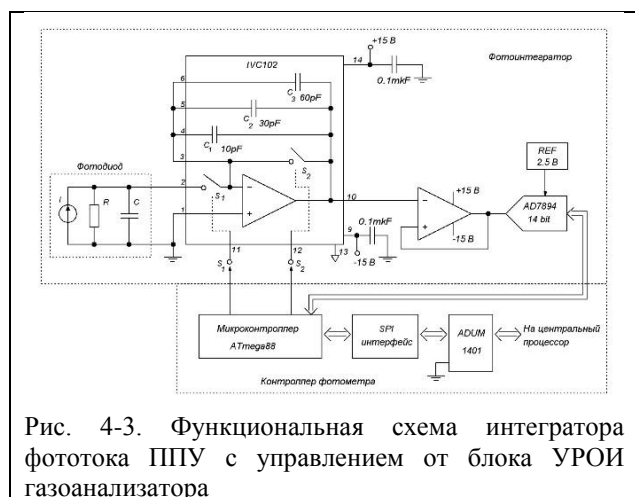
Таблица 4-1. Сравнение экспериментальных и расчетных значений.

	Теория	Эксперимент
Пороговая чувствительность	$P_{пор теор} = 0.59 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$	$P_{пор эксп} = 0.66 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$
Светорассеяние воздухом	$P_{воздух теор} = 0.1 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$	$P_{воздуха эксп} = 0.11 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$
Светорассеяние одной аэрозольной частицей	$P_{частицы теор} = 0.35 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$	$P_{частицы эксп} = 0.38 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}$

Экспериментально измеренные значения мощности светорассеяния аэрозольными частицами и воздухом в фотометрируемом объеме малогабаритного аэрозольного фотометра ППУ детектора МоЯК превышают теоретически рассчитанные значения всего на 8-10%, что для термодинамических величин, каковыми являются молекулярное светорассеяние аэрозольными частицами и воздухом, считается измерениями с высокой степенью точности.

Программно-аппаратный блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ), входящий в состав ППУ газоанализатора, управляет временем интегрирования фототока, измеряет темновой ток фотоприёмного устройства, фототок светорассеяния от фона спонтанного ядрообразования и фототок светорассеяния аэрозольными частицами в фотометре и автоматически вычисляет измеряемую концентрацию целевого компонента. На персональном компьютере реализован экраный интерфейс для установки и контроля режимов, температур, параметров блоков газоанализатора и вывода на график фототока светорассеяния аэрозольными частицами. Блок УРОИ осуществляет передачу данных на персональный компьютер по локальной сети Ethernet и протоколу RS-232. В случае превышения ПДК_{р.з.} блок УРОИ выдает звуковой и световой сигналы тревоги. Блок УРОИ управляет также конденсационными устройствами, охладителем, ГХ-колонкой, термореактором, краном-переключателем, дозатором, фотометром, устройством пробоотбора и десорбции, осветителем, контролирует основные параметры ГА.

Функциональная схема интегратора фототока ППУ с контроллером газоанализатора имеет



вид, приведенный на рис. 4-3. Для обеспечения чувствительности газоанализатора ниже уровней ПДК в интеграторе фототока применено измерение с последующим усреднением тангенса угла наклона зависимости фототока от времени, а также усреднение результатов измерений. Данный алгоритм был реализован в процессоре блока УРОИ и позволил регистрировать фототоки светорассеяния аэрозольными частицами на уровне десятков ϕA .

Глава 5 «Шумовое согласование приборов на поверхностных акустических волнах в приемно-преобразующих устройствах» посвящена разработке методики комплексной оптимизации параметров акустоэлектронных приборов на ПАВ и усилителей с целью достижения минимального коэффициента шума ППУ при удовлетворении технических требований к данному классу устройств на ПАВ.

Экспериментальные исследования эквивалентного шумового тока встречно-штыревого преобразователя (ВШП) показывают, что спектральная плотность среднеквадратичного значения шумового тока ВШП описывается выражением $\overline{I_n^2} = 4kTG_a$, где G_a - проводимость излучения ВШП. Для обоснования выявленной связи разработан малошумящий усилитель, позволяющий ввести в ППУ противозумовую коррекцию, снизить уровень трехпролетного эхо-сигнала поверхностной акустической волны за счет включения входного транзистора усилителя по схеме с общей базой. Применение предложенного усилителя понизило спектральную плотность мощности шума усилителя настолько, что спектральная плотность мощности шума ВШП в 3 - 5 раз превосходила значение спектральной плотности мощности шума собственно усилителя. Таким образом, впервые было экспериментально подтверждено, что динамический диапазон пьезокристаллических устройств на ПАВ с малошумящим предварительным усилителем и противозумовой коррекцией определяется, в основном, именно шумами пьезокристаллических устройств, а не шумами предварительного усилителя.

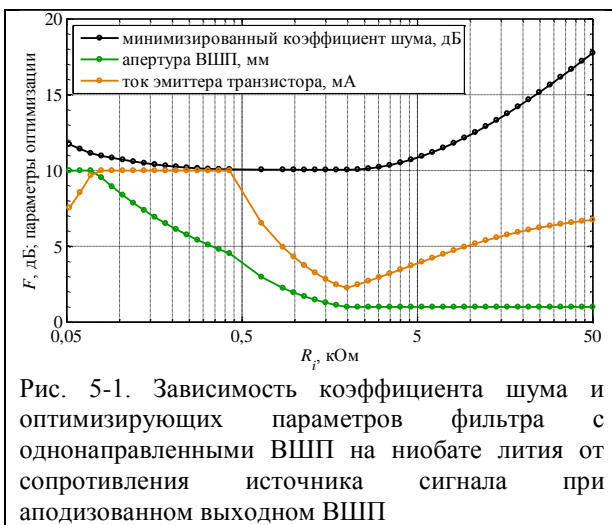
Выражение для коэффициента шума прибора на ПАВ с усилителем, полученное на основании предложенной эквивалентной шумовой схемы прибора на ПАВ с усилителем и противозумовыми коррекциями, имеет вид:

$$F = 1 + 2(wF_{amp} - 1) + \frac{G_{11}}{G_i} \left\{ wF_{amp} \left(1 + \frac{(B_i + B_{L1} + B_{11})^2}{G_{11}^2} \right) - 1 \right\} + \frac{G_i}{G_{11}} wF_{amp} \quad (5.1)$$

$$F_{amp} = 1 + \frac{G_n}{G_{22}} + R_n G_{22} \left(1 + \frac{(B_{22} + B_{L2})^2}{G_{22}} \right) + \frac{B_{22} + B_{L2}}{G_{22}} 2\beta \sqrt{R_n G_n} + 2\alpha \sqrt{R_n G_n}$$

где $Y_{11} = G_{11} + jB_{11}$, $Y_{22} = G_{22} + jB_{22}$, $Y_i = G_i + jB_i$ - проводимости излучения входного и выходного ВШП и источника сигнала соответственно; R_n , G_n и $\gamma = \alpha + j\beta$ - рациональная система шумовых параметров усилителя; B_{L1} и B_{L2} - проводимости противозумовых коррекций входного и выходного ВШП; $w = G_{11}G_{22}/Y_{21}^2$ - параметр направленности, определяемый конструкцией прибора на ПАВ. Минимальное значение параметра направленности w в случае двунаправленных ВШП на частоте акустического синхронизма равно двум. В случае идеальных однонаправленных ВШП $w=1$. Минимальное значение собственного коэффициента шума при согласованном источнике сигнала для двунаправленных ВШП, в соответствии с полученным выражением при $F_{amp}=1$, может составлять величину около 7 дБ.

Обеспечение режима полного шумового согласования в пьезокристаллических устройствах на ПАВ со встроенными транзисторными усилителями должно проводиться при удовлетворении основных рабочих характеристик, присущих каждому конкретному классу устройств на ПАВ. Например, к радиочастотным линиям задержки на ПАВ предъявляются требования по обеспечению заданной полосы пропускания и уровню подавления трехпролётного эхо-сигнала. Для фильтров на ПАВ к этим требованиям добавляются заданный уровень селективности по боковым лепесткам, коэффициент прямоугোলности АЧХ. Таким образом, задача минимизации общего уровня шума пьезокристаллических устройств на ПАВ, работающих совместно с транзисторным усилителем, сводится к минимизации функционала (5.1) при ограничениях, наложение которых связано с удовлетворением характерных для данного класса устройств технических параметров. Решение поставленной задачи может быть осуществлено методом нелинейного программирования при соответствующих классу устройств нелинейных ограничениях. Для демонстрации указанной возможности проведена комплексная оптимизация совокупности параметров радиочастотных линий задержки (РЛЗ) и фильтров с усилителем методом нелинейного программирования с ограничениями. Наложение ограничений связано с



удовлетворением заданной полосы пропускания устройства и уровню подавления трехпролётного эхо-сигнала, а также техническими ограничениями на оптимизирующие параметры прибора на ПАВ и усилителя (апертюра и количество электродов ВШП, ток входного каскада усилителя). Результаты расчетов представлены в виде графиков (рис. 5-1) и согласуются с полученными экспериментальными данными с точностью 5%. Расчеты производились в среде LabVIEW,

использующей скрипты нелинейной оптимизации пакета MATLAB.

Коэффициент шума пассивных устройств, к которым относятся приборы на ПАВ, равен обратной величине коэффициента передачи по мощности. Поэтому коэффициент шума прибора на ПАВ с усилителем может достигать 40 дБ. Применение предложенной в диссертации методики оптимизации позволяет конструировать ППУ с использованием приборов на ПАВ с минимизированным коэффициентом шума 10 дБ при двунаправленных ВШП и 5 дБ при однонаправленных ВШП. Для того, чтобы использование прибора на ПАВ, обладающего значительными потерями, не увеличивало коэффициент шума всего ППУ, необходимо выполнение условия, следующего из формулы Фрииса $K_p > F$, где K_p - номинальный коэффициент передачи по мощности предусилителя, F - коэффициент шума фильтра на ПАВ с выходным

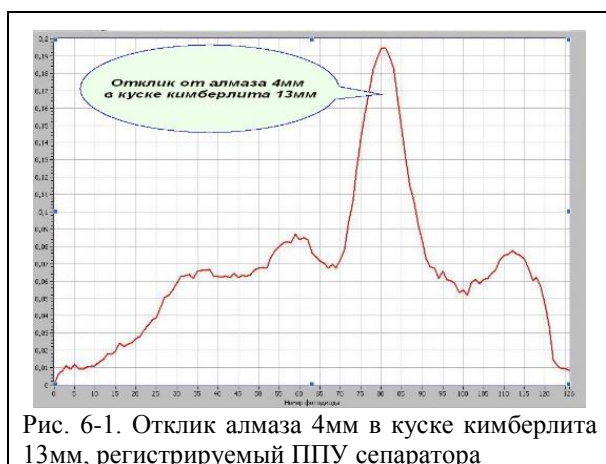
усилителем. Для больших значений F требуются большие значения K_p . Однако, при фиксированном значении потребляемой мощности от источника питания, рост K_p приводит к снижению уровня максимального входного сигнала, что снижает динамический диапазон приемного блока. Минимальные нелинейные искажения в ППУ будут иметь место в случае использования оптимизации по шумам ПАВ фильтра и выходного усилителя.

На основе предложенной методики оптимизации ППУ с использованием фильтров на ПАВ разработан двухканальный волоконно-оптический модем передачи видеосигналов со звуковым сопровождением с использованием частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). Полосовые фильтры на ПАВ в модеме имеют центральные частоты 40 и 60 МГц, полосы пропускания 20%, выполнены на подложке ниобата лития. Применение методики оптимизации ППУ с использованием устройств на ПАВ позволило реализовать чувствительность модема к оптическому сигналу на уровне 2,0 мкВт при уровне перекрестной помехи между каналами -60 дБ.

В Главе 6 «Приемно-преобразующие устройства рентгено-абсорбционных сепараторов извлечения природных алмазов в кусках кимберлита» развит комплексный подход к решению задачи учета фундаментальных ограничений, определяемых ППУ рентгено-абсорбционных сепараторов, к которым относятся: а) чувствительность фотоприемного устройства ППУ сепаратора при минимальном времени интегрирования и б) ослабление электромагнитных волн рентгеновского диапазона различными средами: элементами, веществами, фильтрами, сцинтилляторами и иммерсионными средами.

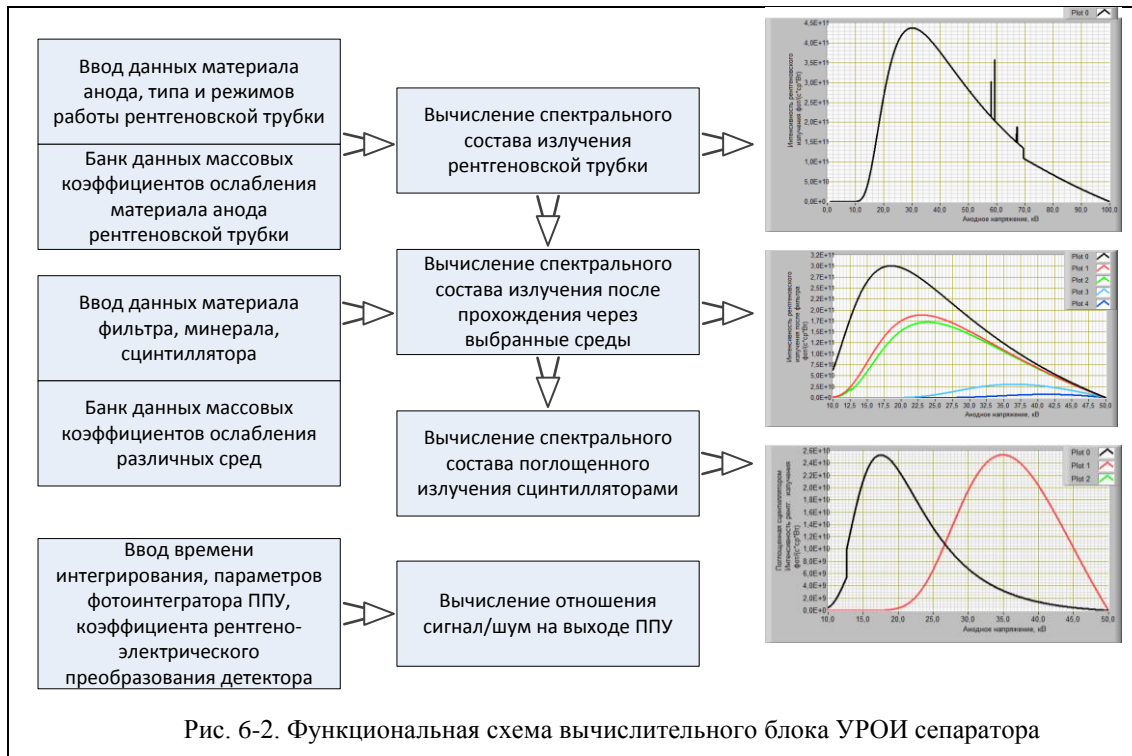
В измерительном блоке ППУ используется позиционно-чувствительный датчик рентгеновского излучения, состоящий из 2-х линеек по 128 фотодиодов, покрытых слоем сцинтиллятора оксисульфида гадолиния, легированного тербием ($Gd_2O_2S:Tb$). Сцинтиллятор преобразует рентгеновское излучение в видимый свет, который регистрируется фотодиодами.

Фотозаряды каждого фотодиода усиливаются своим операционным усилителем интегрирующего типа и последовательно передаются сдвиговым регистром на выход. Время интегрирования фотоинтеграторами задается блоком управления, регистрации и обработки информации (УРОИ),



реализованном на ПЛИС. Последовательность отсчетов фототока передается по Ethernet сети на компьютер, на котором используется программная среда LabVIEW. Применение Ethernet технологии позволяет дистанционно проводить измерения рентгеновского излучения и устанавливать требуемые технические параметры (время интегрирования фототока и др.). Визуализация измеряемой интенсивности проникающего

рентгеновского излучения осуществляется на экране монитора в режиме реального времени (рис. 6-1). Требуемое характерное время измерения проникающего рентгеновского излучения достигает долей миллисекунд и меньше. Как следует из Главы 2 диссертации, для расчета чувствительности ФПУ в этом случае должны использоваться полученные выражения приближений, отличных от модели идеального фотоинтегратора. Выражения громоздки и реализованы в вычислительном блоке УРОИ сепаратора, функциональная схема которого представлена на рис. 6-2.

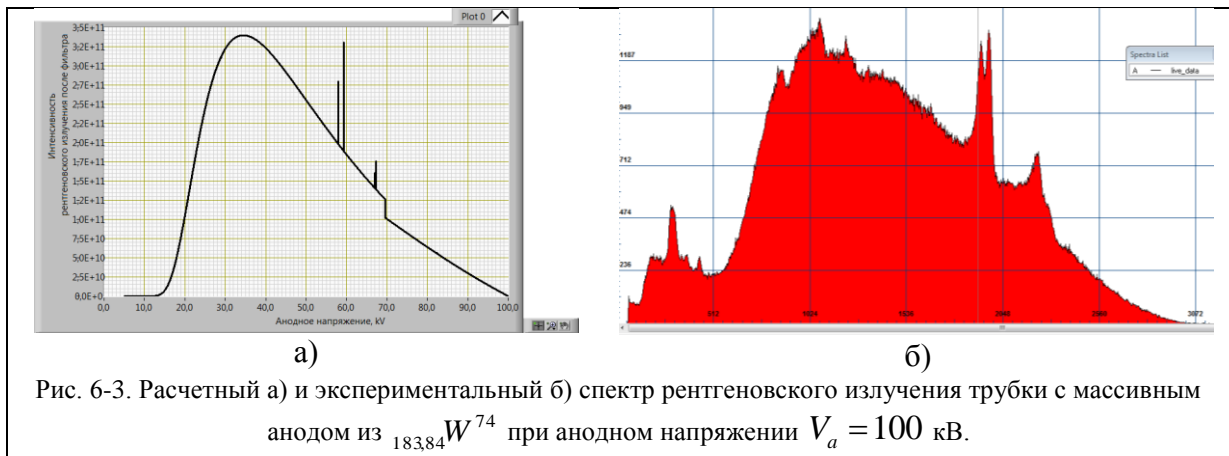


Ослабление интенсивности рентгеновского излучения слоем вещества толщиной x определяется законом Бугера-Ламберта: $I_x = I_0 \cdot \exp\{-\mu_x \cdot x\} = I_0 \cdot \exp\{-\mu_m \cdot \rho \cdot x\}$, где μ_x - линейный и μ_m - массовый коэффициенты ослабления рентгеновского излучения вещества. Величина μ_m характеризует ослабление излучения единицей массы образца и имеет размерность $[\mu_m] = \text{см}^2/\text{г}$. Массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения не зависит от плотности вещества, то есть от его физического состояния. Поэтому величины этих коэффициентов могут быть представлены для всех элементов и различных диапазонов энергий рентгеновских фотонов. В настоящее время имеется ряд таблиц, содержащих экспериментальные и расчетные значения массовых коэффициентов ослабления. В диссертации использованы зависимости экспериментальные величины массовых коэффициентов ослабления, опубликованные Национальным Институтом Стандартов и Технологий США на сайте <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>. В диссертации в основу математической модели ослабления (поглощения + рассеяния) рентгеновского излучения в веществе положена аппроксимация энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления от энергии рентгеновского фотона в виде суммы двух степенных функций:

$$\begin{cases} \mu_1 = a_{11}E^{-b_{11}} + a_{12}E^{-b_{12}} + c_1, & E < E_k \\ \mu_2 = a_{21}E^{-b_{21}} + a_{22}E^{-b_{22}} + c_2, & E \geq E_k \end{cases}$$

где E_k - энергия K -края поглощения. Относительная погрешность данной аппроксимации не превышает 1% в диапазоне энергий 1-150 кэВ. Зависимость массового коэффициента ослабления от энергии $\mu_m(E)$ позволяет использовать различные вещества в качестве фильтров, позволяющих менять спектральный состав проникающего рентгеновского излучения. В Таблице 6-3 диссертации приведены значения коэффициентов разработанной в диссертации аппроксимации практически всех элементов таблицы Менделеева.

Тестирование математической модели, используемой в системе, проведено путем расчета (рис. 6-3 а) и измерения (рис. 6-3 б) спектрального состава излучения рентгеновской трубки с массивным анодом из вольфрама при анодном напряжении 100 кВ.



Измерения спектрального состава излучения рентгеновской трубки проводились рентгеновским спектрометром X-123 CdTe фирмы Amptek. Чувствительным к рентгеновскому излучению элементом является сцинтиллятор CdTe (теллурид кадмия). Для измерения спектральных характеристик излучения на спектрометр должен поступать поток единичных фотонов. Уширение характеристических линий излучения объясняется сравнительно низким разрешением спектрометра, составляющим 1.2 кэВ. Результаты расчетов совпали с экспериментальными измерениями спектрального состава тормозного излучения рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом с точностью 2 - 3 %, что является вполне приемлемой точностью для рентгеновских измерений.

Глава 7 «Реализация результатов работы в промышленных и экспериментальных изделиях и системах» посвящена особенностям применения разработанных методик к проектированию ППУ промышленных и экспериментальных изделий и систем, внедрённых в народное хозяйство.

При конструировании ФПУ ППУ волоконно-оптических систем, перечисленных в разделе «Реализация и внедрение результатов работы» автореферата, дополнительно к предложенным автором методикам потребовалась разработка принципиальных электрических схем и

конструкции ФПУ, позволяющие достижение максимальной чувствительности. В разработанных ФПУ изменением параметров элементов схемы возможно задавать быстродействие (полосу рабочих частот) и при этом чувствительность ФПУ принимает минимально возможное значение, соответствующее быстродействию. Реализация схем осуществлена по гибридно-пленочной технологии. С целью обеспечения минимальных емкостей и электромагнитных наводок, конструкция ФПУ представляет единый модуль фотодетектора и усилителя. В итоге создан целый класс миниатюрных фотоприёмных модулей ФПУ-01, ФПУ-02, ФПМ-НЧ, ФПМ-ВЧ, ФПМ-НЧМ, ФПМ-ВЧМ, ФПМ-АРУ, ФПМ-СМ1, ФПМ-СМ2, ФПМ-СМ1-О, ФПМ-СМ2-О. В качестве примера на рис. 7-1 приведен внешний вид волоконно-оптического модуля ФПУ-НЧ.



Рис. 7-1. Фотоприемное устройство ФПУ-НЧ.

Разработанные малогабаритные фотоприёмные модули имеют чувствительность, сравнимую с лучшими мировыми образцами и нашли широкое применение в аппаратуре волоконно-оптических систем передачи информации. Разработанные модули фотоприёмных устройств внедрены в модемы передачи телевизионного сигнала: а) студийного качества с цифровым кодированием и б) полного цветового высококачественного телевизионного изображения с использованием частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). При конструировании модемов использовались методики расчета

чувствительности ФПУ, предложенные в диссертации. Дополнительно к практическим вопросам оптимизации чувствительности ФПУ при внедрении студийных модемов передачи телевизионных сигналов потребовалось решение проблем: а) мультиплексирования 4-х каналов передачи стереофонического звука и 2-х каналов передачи данных со скоростью 2.048 Мбит/с с низким уровнем (ниже -70 дБ) перекрестных искажений между каналами, б) обеспечения требований электромагнитной совместимости. Эти проблемы решены моделированием в пакетах SPECCTRA Quest SI Expert (компания CADENCE), Protel DXP (компания ALTIUM), что обеспечило высококачественную разводку многослойных печатных плат. В результате создан студийный волоконно-оптический модем передачи видеосигнала в цифровой форме BOM-124, внешний вид

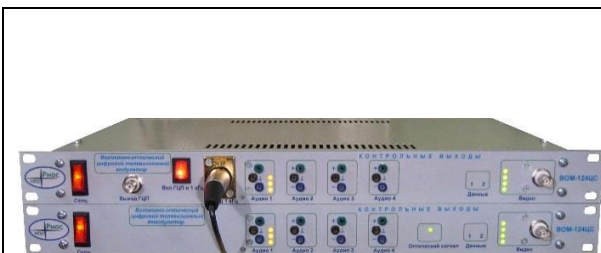


Рис. 7-2. Студийный волоконно-оптический модем передачи видеосигнала в цифровой форме



Рис. 7-3. Миниатюрный телевизионный волоконно-оптический модем

которого представлен на рис 7-2. Дальность передачи мультиплексированного потока с отношением сигнал/шум 72 дБ составляет до 40 км при использовании лазера и одномодового волокна. Модемы ВОМ-124 внедрены в Центре Междугородной Связи «телецентра на Чапыгина, б» в Санкт-Петербурге, а также в телестудиях регионального телевидения в г. Уфа, Гомеле и др.

Миниатюрный телевизионный волоконно-оптический модем ОМ-1 разрабатывался, в основном, для внедрения в сети промышленной безопасности и управления производством, особенностью которых является эксплуатация их в условиях сильных помех. Таким образом, дополнительными требованиями являются обеспечение электромагнитной совместимости и разработка схмотехнических решений, обеспечивающих низкую стоимость изделия. Применение волоконной оптики в данном случае позволяет решить эти проблемы. В результате создан модем, внешний вид которого представлен на рис 7-3. Дальность передачи видеосигнала с отношением сигнал/шум не ниже 60 дБ составляет 6 км при использовании многомодового волокна и светодиодного источника, и до 40 км при использовании лазера и одномодового волокна. С использованием разработанного миниатюрного телевизионного волоконно-оптического модема создана волоконно-оптическая сеть промышленной безопасности и управления производством на ОАО «Северсталь-метиз», входящем в холдинг «Северсталь». Сеть объединяет 40 видеокамер, 37 волоконно-оптических линий. Протяженность трасс варьируются от 200 до 1,2 км, суммарная длина волоконно-оптического кабеля ~26 км. Сеть обеспечивает бесперебойную работу в условиях высоких электромагнитных помех.

При конструировании ППУ газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК, перечисленных в разделе «Реализация и внедрение результатов работы» автореферата, дополнительно к предложенным автором методикам Главы 3 и 4 потребовалась разработка конструктива фотометра ППУ, компоновка узлов газоанализатора в единый переносной корпус, обеспечение пневматической и электрической схем соединения узлов, работающих под управлением УРОИ. В результате сконструирована серия газоанализаторов на различные определяемые примеси вредных веществ в окружающей среде.



Рис. 7-4а. Узлы газоанализатора карбониллов металлов.

Рис. 7-4б. Газоанализатор карбониллов металлов.

В качестве примера на рис. 7-4 показаны узлы, включая ППУ, и внешний вид газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК на летучие карбонилы металлов, применяемого на предприятиях обогащения цветных металлов по карбонильной технологии. Применение разработанных ППУ обеспечило реализацию высоких потенциальных возможностей метода МоЯК.



Рис. 7-5. ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора.

Проектирование ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора включало дополнительную особенность, связанную с разработкой программ управления узлами экспериментального сепаратора (подачи руды и иммерсионной среды, выделения кусков с алмазами из общего потока руды по команде из УРОИ ППУ), а также общего алгоритма функционирования сепаратора. Алгоритм и программы реализованы на ПЛИС ALTERA (в настоящее время Intel FPGA) семейства Stratix-II EP2S60F672C3. Внешний вид разработанного ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора представлен на рис. 7-5. ППУ состоит из блока рентгеновского

детектора, включающего сцинтиллятор на основе оксисульфида гадолиния, легированного тербием, двух линеек по 128 фотоинтеграторов, сдвиговому регистру передачи зарядовых пакетов, АЦП, микросхем согласования уровней сигналов, и блока контроллера, включающего ПЛИС, микросхемы памяти и протокола TCP/IP. Проведенные на сепараторе испытания однозначно демонстрируют возможность создания промышленной технологии извлечения природных алмазов в кусках кимберлита. Экспериментальный образец рентгено-абсорбционного сепаратора демонстрировался на международных выставках и отмечен дипломами и двумя золотыми и одной серебряной медалями выставок. В настоящее время рентгено-абсорбционный сепаратор проходит стадию подготовки к промышленному производству на ООО «ЭГОНТ».

В Заключении кратко перечислены полученные результаты и изложены разработанные на основании их рекомендации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработанная методика расчета коэффициента шума предусилителей фотоприемных устройств ППУ с отрицательной обратной связью через известный коэффициент шума усилителя без обратной связи позволяет использовать выражения коэффициента шума усилителей для расчета чувствительности фотоприемных устройств ППУ методом эквивалентных канонических шумовых схем.
2. Разработанный метод эквивалентных канонических шумовых схем формализован и распространён на случаи использования в фотоприёмных устройствах ППУ усилителей на

биполярных транзисторах с гетеропереходом (НВТ), псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (РНЕМТ), арсенид-галлиевых полевых транзисторов (GaAs FET) в микроволновом диапазоне.

3. Результаты теоретических расчётов чувствительности фотоприемных устройств ППУ находятся в хорошем соответствии (с точностью до $5 \div 10$ %) с экспериментальными значениями, как полученными в процессе собственных исследований автора работы, так и опубликованными другими исследователями для широкого спектра используемых в ФПУ активных элементов (биполярные транзисторы, полевые транзисторы, транзисторы с гетеропереходом, псевдоморфные транзисторы). Разработанная методика расчёта чувствительности успешно использовалась при проектировании целого ряда отечественных ФПУ на НПО «Авангард», в СПбПУ, в НПО «Волна», в МГП «Ротек», в «Фобос-3» и др.

4. Форма амплитудно-частотной характеристики фотоприемного устройства ППУ может быть представлена двухполюсной моделью вида $|Z_{tr}| = \frac{|Z_{0tr}|}{\sqrt{(1 - (\varpi \cdot \tau)^2 m)^2 + (\varpi \cdot \tau)^2}}$, где τ – постоянная

времени ФПУ и m – коэффициент автокоррекции АЧХ. Существуют методики [27] приближенного расчета цепей, которые позволяют свести характеристическое уравнение высокого порядка к уравнению второго порядка, то есть к двухполюсной модели. В диссертации с помощью теории вычетов функции комплексной переменной впервые получена зависимость чувствительности фотоприемного устройства ППУ от параметров АЧХ τ и m

фотоприемного устройства в простом компактном виде $P_{pin} = \frac{SNR \sqrt{kT}}{S} \cdot \sqrt{\frac{C}{\tau} + \frac{D}{\tau^3 m}}$.

Полученное выражение позволяет оптимизировать параметры ФПУ с целью достижения компромиссных требований по чувствительности и быстродействию фотоприемного устройства ППУ.

5. Разработанная методика расчета чувствительности фотоприемных устройств позволяет определять значение минимальной детектируемой девиации фазовой модуляции радиотехнических ППУ фазомодулированных оптических сигналов, характеризующей фундаментальное ограничение шумами ФПУ, с точностью до $5 \div 10$ %, что позволяет осуществлять обоснованный выбор параметров ФПУ для удовлетворения техническим требованиям к радиотехническим ППУ фазомодулированным оптическим сигналам с учетом применения в оптической схеме мультиплексирования сигналов нескольких датчиков физических величин.
6. Передаточная характеристика ППУ оптико-электронных систем с интегрированием фототока характеризуется двухполюсной моделью. В отличие от фотоприемных устройств без интегрирования фототока, где автокоррекция АЧХ позволяет расширить рабочую полосу

частот фотоприемного устройства ППУ, в фотоинтеграторе требуется максимально приблизить режим работы к идеальному интегратору. В диссертации определено такое условие в виде $T_{\text{int}} \gg \frac{C_H + C_d + C_{oy}}{\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_{oy}} + \omega_1 C_H}$. В измерительных ППУ оптико-электронных систем

данное условие должно неукоснительно соблюдаться.

7. В отличие от фотоприемных устройств ППУ измерительного типа (например, ППУ оптико-электронной системы газоанализатора на основе эффекта МоЯК) находят применение ППУ, назначением которых является обнаружение превышения уровня сигнала над средним значением. Для таких ППУ требования по искажениям сигнала являются второстепенными, а на первый план выходят требования по чувствительности и быстродействию. Примером таких ППУ может служить разработанное ППУ рентгено-абсорбционного сепаратора с пониженным значением времени интегрирования при сохранении требуемой чувствительности сепаратора. В этом случае необходимо применять полные выражения для расчета чувствительности ФПУ интегрирующего типа, полученные в диссертации.
8. Чувствительность к световому потоку фотоприемных устройств ППУ оптико-электронных систем с интегрированием фототока может быть определена методом эквивалентных шумовых схем на основе временных представлений с использованием свертки автокорреляционной функции и импульсной характеристики цепи.
9. Происходящее в ППУ рассеяние электромагнитной волны оптического диапазона частицами аэрозоля, образованного в конденсационных устройствах газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК, имеет интерференционный немонотонный характер. При этом интенсивность рассеянного поля в направлении «вперед» значительно (примерно в 100 раз) превышает величину интенсивности в обратном направлении и убывает с увеличением длины волны оптического излучения и угла светорассеивания.
10. Интенсивность рассеяния электромагнитной волны оптического диапазона воздухом в фотометрируемом объеме ППУ газоанализаторов на основе эффекта проявления МоЯК максимальна и одинакова в направлениях угла рассеяния 0° («вперед») и 180° («назад») и минимальна при углах рассеяния 90° , резко уменьшается ($\sim 1/\lambda^4$) с увеличением длины волны оптического излучения и по своему значению сопоставима со светорассеянием аэрозольными частицами. В ультрафиолетовой области оптического излучения равенство мощностей светорассеяния воздухом и аэрозольной частицей достигается при меньших углах светорассеяния, чем в видимой и инфракрасной области.
11. Интенсивность рассеяния аэрозольной частицей при оптимальном угле наблюдения всего в три раза превышает интенсивность рассеяния воздухом в фотометрируемом объеме

аэрозольной камеры ППУ газоанализатора на эффекте проявления МоЯК и в 10^{15} раз превышает светорассеяние самой молекулы детектируемой примеси.

12. Экспериментально измеренные значения мощности светорассеяния аэрозольными частицами и воздухом в фотометрируемом объеме малогабаритного аэрозольного фотометра всего на $8 \div 10\%$ превышают теоретически рассчитанные, что для термодинамических величин, каковыми являются молекулярное светорассеяние воздухом и аэрозольными частицами, можно считать измерениями с высокой степенью точности.
13. Использование ФЭУ и интегратора в составе фотоприемного устройства ППУ газоанализатора на эффекте проявления МоЯК позволяет калибровать газоанализатор по светорассеянию воздуха в фотометрическом объеме камеры нефелометра.
14. Интегратор фототока оптико-электронной системы, основанный на усреднении измеренных значений тангенса угла наклона зависимости фототока от времени, позволяет регистрировать фототоки светорассеяния аэрозольными частицами на уровне десятков ϕA , при этом динамический диапазон ППУ составляет 160 дБ.
15. Программно-аппаратный микропроцессорный блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ), осуществляющий установку режимов, измерение, визуализацию, контроль температур и обработку фототока светорассеяния аэрозольными частицами обеспечивает автоматическое измерение концентрации вредных веществ с точностью до $1 \div 2\%$.
16. Улучшение конструкции малогабаритного аэрозольного фотометра и оптико-электронной части ППУ позволили достигнуть предела обнаружения целевого компонента газоанализатора на основе эффекта проявления МоЯК на уровне спонтанной нуклеации ядрообразования, а не предельной чувствительности ППУ оптико-электронной системы, что составляет для определенных классов вредных веществ значение вплоть до $0,05 \div 0,1$ предельно-допустимой концентрации (ПДК).
17. Использование противозумовой коррекции в малошумящем транзисторном усилителе с ОБ позволяет снизить шумы усилителя настолько, что спектральная плотность мощности шума ВШП до $5 \div 7$ раз превосходит значение спектральной плотности мощности шума собственного усилителя. Оптимизация параметров пьезоплаты и входного каскада усилителя дает возможность снижения коэффициента шума микросборок радиочастотных линий задержки и фильтров на ПАВ со встроенными транзисторными усилителями до уровня $10 \div 12$ дБ. При этом рабочие характеристики устройств также полностью сохраняются. Предложенный метод оптимизации по критерию максимального отношения сигнала к шуму возможно распространить на широкий класс устройств на ПАВ, что потребует лишь изменения нелинейных ограничений в задаче оптимизации.

18. Использование оптимизации совокупности параметров фильтров на ПАВ и электронного обрамления по критерию минимизации уровня шума позволяет проектировать многоканальные волоконно-оптические системы передачи высококачественных телевизионных сигналов с минимальными (на уровне $-65 \div 70$ дБ) перекрестными искажениями между каналами.
19. Предложенная аппроксимация энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления электромагнитного излучения рентгеновского диапазона суммой двух степенных функций обеспечивает относительную погрешность 1% в диапазоне 1-150 кэВ. Разработанная, на основе предложенной в диссертации аппроксимации, программа расчета проникающего электромагнитного излучения рентгеновского диапазона в среде LabVIEW позволяет рассчитывать спектры излучения рентгеновских трубок с различными материалами и типами анодов при различных напряжениях и токах трубок, а также спектры рентгеновского излучения после прохождения фильтров и сцинтилляторов из различных материалов и алмазосодержащей руды. Результаты расчетов совпали с экспериментальными измерениями спектрального состава излучения рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом с высокой точностью (до $2 \div 3$ %).
20. Применение разработанной программы расчета проникающего рентгеновского излучения на основе аппроксимации энергетической зависимости массовых коэффициентов ослабления электромагнитного излучения рентгеновского диапазона суммой двух степенных функций создает основу для проектирования двуэнергетических рентгеновских систем.
21. Предложенные оригинальные схемотехнические решения позволили создать ряд серийно-способных ППУ драйверов акустооптических модуляторов, малогабаритных высокочувствительных фотоприёмных устройств для региональных и внутриобъектовых ВОСПИ, открытых линий передачи, обеспечивающих обработку как аналоговых, так и цифровых сигналов в широком диапазоне частот. Внедрение модулей ФПУ позволило повысить в 2-3 раза дальность действия волоконно-оптических линий связи за счёт повышения чувствительности ФПУ.
22. Впервые в РФ была разработана и внедрена цифровая система передачи видеосигнала ВОМ-124 с частотой оцифровки телевизионного сигнала 27 МГц в соответствии со стандартами ITU-R BT 601 и ITU-R BT 656, что соответствует уровню профессионального студийного качества. Использование методики расчета чувствительности ФПУ радиотехнических ППУ, предложенной в диссертации, определило дальность передачи мультиплексированного потока 40 км с отношением сигнал/шум 72 дБ при использовании лазера и одномодового волокна.
23. Разработаны и внедрены в промышленно эксплуатируемые телекоммуникационные системы миниатюрные волоконно-оптические модемы передачи телевизионного сигнала по

волоконно-оптическому кабелю. Телевизионные волоконно-оптические модемы обладают большой дальностью передачи, высоким отношением сигнал/шум, малыми потребляемой мощностью, габаритами и массой. Использование миниатюрных телевизионных волоконно-оптических модемов определило безотказную круглосуточную работу спроектированных и внедрённых сетей видеонаблюдения в условиях сильных электромагнитных помех, свойственных промышленным объектам.

24. Впервые разработанный волоконно-оптический регистратор временных задержек моментов срабатывания источников ударных волн в сейсморазведке, представляющий собой радиотехническое ППУ, позволяет повысить точность определения моментов срабатывания источников ударных волн в десятки раз, что позволяет повысить точность привязки сейсмограмм к местности.
25. Разработанные на основе предложенных в диссертации методик конструирования радиотехнических ППУ: малогабаритный аэрозольный фотометр, интегратор фототока и блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ) позволили впервые реализовать чувствительность газоанализаторов на основе эффекта проявления молекулярных ядер конденсации (МоЯК) к ряду вредных и опасных веществ до десятых долей предельно допустимых концентраций (ПДК), что существенно превышает мировой уровень.
26. Внедрение разработанных и серийно изготовленных газоанализаторов на МоЯК для измерения концентраций отравляющих веществ иприта и люизита создало инструментальную базу для мониторинга атмосферы на производствах по уничтожению химического оружия, что определило успешное выполнение работ по ФЦП «Уничтожение химического оружия в Российской Федерации».
27. Впервые в мировой практике создан экспериментальный образец рентгено-абсорбционного сепаратора извлечения алмазов, находящихся внутри кусков кимберлита, в состав которого входит разработанное на основе предложенных в диссертации методик радиотехническое ППУ, обеспечившее возможность регистрации алмазов в толщине руды до 30 мм, что является уникальным достижением в горно-обогатительных технологиях. Экспериментальный образец разработанного рентгено-абсорбционного сепаратора отмечен **золотой** медалью на Международной выставке и конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (Санкт-Петербург, 2008), **золотой** медалью на II Международной выставке и конгрессе «Перспективные технологии XXI века» (Москва, 2008), **серебряной** медалью на Петербургской технической ярмарке (Санкт-Петербург, 2008).

В Приложениях 1-5 приведены результаты расчета по предложенным методикам чувствительности однокаскадных, двухкаскадных ФПУ с предусилителями на полевых и биполярных транзисторах, на биполярном транзисторе с гетеропереходом, на полевом транзисторе

в микроволновом диапазоне. После приложений 1-5 следуют акты об использовании и внедрении результатов исследования и разработок новых устройств в количестве 12-ти актов и копии дипломов Международных выставок о награждении экспонатов золотыми и серебряными медалями.

Основные публикации по теме диссертации:

Монография:

- A1. Купцов, В.Д. Оптико-электронные устройства газоанализаторов на основе эффекта проявления молекулярных ядер конденсации / В.Д. Купцов, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов. – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2012. – 142 с.

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК:

- A2. Валюхов, В.П. Согласование фильтров на поверхностных акустических волнах в радиоэлектронных трактах / В.П. Валюхов, Ю.В. Иванов, В.Д. Купцов // Радиотехника. – 1998. – № 1. – С. 82-87.
- A3. Валюхов, В.П. Расчет коэффициента шума каскадных широкополосных усилителей / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, А.И. Сурыгин // Известия вузов. Радиоэлектроника. –1984. – т.27. – № 10. – С. 82-83.
- A4. Купцов, В.Д. Чувствительность фотоприемных устройств волоконно-оптических линий связи / В.Д. Купцов, В.П. Валюхов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер: ИТУ. – 2010. – т.6. –№ 113. – С. 31-36.
- A5. Купцов, В.Д. Газоанализаторы на основе эффекта молекулярных ядер конденсации / В.Д. Купцов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер: ИТУ. –2010. –т.6. – №113. – С. 145-150.
- A6. Купцов, В.Д. Светорассеяние аэрозольными частицами в газоанализаторах на молекулярных ядрах конденсации / В.Д. Купцов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер: ИТУ. – 2011. – т.1. – № 115. – С. 178-187.
- A7. Демин, С.В. Газоанализаторы на молекулярных ядрах конденсации для определения концентрации отравляющих веществ / С.В. Демин, В.Д. Купцов, В.П. Валюхов, В.Я. Кателевский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер: ИТУ. –2011. –т.2. –№ 120. – С. 183-191.
- A8. Купцов, В.Д. Шумы акустоэлектронных приемных устройств на поверхностных акустических волнах / В.Д. Купцов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер: ИТУ. – 2011. – т.2. – № 120. – С. 47-55.
- A9. Кянджециан, Р.А. Высокочувствительные газоанализаторы на базе детектора молекулярных ядер конденсации для экологического мониторинга и контроля высокоэффективных фильтров / Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, С.В. Демин

//Альтернативная энергетика и экология. – 2011.– №.10.– т.102. – С.32-42.

- A10. Rybin, E.N. Thermodynamics of Nucleation of Supersaturated Vapor on Molecular Condensation Centers / E.N. Rybin, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov // *Technical Physics*. – 2012. – Vol. 57. – № 8. – P. 1062–1067.
- A11. Rybin, E.N. Simulation of Supersaturated Vapor Nucleation on Molecular Condensation Centers / E.N. Rybin, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov // *Technical Physics*. – 2012. – Vol. 57. – № 8. – P. 1068–1074.
- A12. Kuptsov, V.D. Optoelectronic system of the aerosol photometer in the detector of molecular condensation nuclei / V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevskii, V.P. Valyukhov, E.N. Rybin // *Technical Physics*. – 2013. – Vol. 58. – № 8. – P. 1211–1218.
- A13. Пат. 2472595 РФ, МПК В07С 5/346. Способ сепарации минералов / Новиков В.В., Рудаков В.В., Злобин М.Н., Малаховский В.И., Купцов В.Д., Валюхов В.П., Купцов М.В., Ольховой В.А.; заявитель и патентообладатель Новиков В. В. – № 2011150666/12; заявл.14.12.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. №2. – 11 с.
- A14. Купцов, В.Д. Чувствительность фотоприемного устройства на основе интегратора фототока / В.Д. Купцов, В.П. Валюхов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. –2014. – т. 19. – № 7. – С. 17-24.
- A15. Купцов, В.Д. Фотоинтегратор детектора молекулярных ядер конденсации / В.Д. Купцов, В.П. Валюхов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. – 2015. – т. 218. – № 2. – С. 61-73.
- A16. Aladov, A.V. Wireless networks of energy efficient dynamically controlled LED sources / A.V. Aladov, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov, A.L. Zakgeim, M.N. Mizerov, S.V. Demin, A.V. Valyukhova // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. – 2017. – т.10. – №2. – С. 28-36.
- A17. Aladov, A.V. Special features of radio control link for energy efficient LED light sources / A.V. Aladov, V.P. Valyukhov, V.D. Kuptsov, S.V. Demin, A.V. Valyukhova // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. – 2017. – т.10. – №2. – С. 16-27.

Публикации в трудах международных конференций, индексируемые в системах цитирования Scopus и Web of Science:

- A18. Kuptsov, V.D. Light scattering by aerosol particles and air in the molecular condensation nuclei (MCN) detector / V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevsky, V.P. Valyukhov, E.N. Rybin // *Proc. SPIE International Symposium on Optical Engineering + Applications, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces IV*. – 2014. – Vol. 9205.
- A19. Kuptsov, V.D. Optical sensors based on the molecular condensation nuclei detector / V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevsky, V.P. Valyukhov // *Proc. SPIE Optical Sensors*. – 2015. –Vol. 9506.

- A20. Kuptsov, V.D. The threshold sensitivity of the molecular condensation nuclei detector / V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevsky, V.P. Valyukhov // Proc. SPIE International Conference on Optical Metrology. – 2015. – Vol. 9525, Optical Metrology.
- A21. Kuptsov, V.D. The System of Registration and Calculation of Penetrating X-ray / V.D. Kuptsov, J.S. Markelov // Proc. IEEE 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – 2015. – P. 1-5.
- A22. Kuptsov, V.D. Optical instrumentation systems for environmental and structural health monitoring based on the molecular condensation nuclei (MCN) detector / V.D. Kuptsov, V.Y. Katelevsky, V.P. Valyukhov, A.V. Aladov // Proc. SPIE, Optical Sensing and Detection IV. – 2015. – Vol. 9899. – P. 98991X.
- A23. Kuptsov, V.D. Noise optimization of surface acoustic wave devices in electronic systems / V.D. Kuptsov // Proc. 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). – 2016. – P.1–4.
- A24. Aladov, A.V. Spatial distribution of current density and thermal resistance of high-power AlInGaN "vertical" and "face-up" light-emitting diodes / A.V. Aladov, V.D. Kuptsov, A.E. Chernyakov, A.L. Zakgeim, V.P. Valyukhov // Proc. SPIE Optical Design and Testing VII. – 2016. – Vol. 10021.
- A25. Kuptsov, V.D. Noise Factor Optimization of Surface Acoustic Wave Filters / V.D. Kuptsov // Proc. 2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO). – 2017. – P. 1-3.

Публикации в других изданиях:

- A26. Валюхов, В.П. Исследование вопросов чувствительности широкополосных устройств ВОЛС / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Тезисы докладов Всесоюзной конференции, г. Киев. –1983. – С. 41.
- A27. Валюхов, В.П. К вопросу определения чувствительности фотоприемных устройств / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Вопросы радиоэлектроники, сер. ТПО. – 1984. – № 3. – С. 33-39.
- A28. Груздев, А.В. Исследование шумовых характеристик пьезокристаллических устройств на поверхностных акустических волнах / А.В. Груздев, В.Д. Купцов, В.С. Усов // – Вопросы радиоэлектроники, сер. ТПО. – 1988. – № 2. – С. 3-9.
- A29. Груздев, А.В. Исследование шумовых свойств активных пьезокристаллических устройств на поверхностных акустических волнах / А.В. Груздев, В.Д. Купцов, В.С. Усов // Тезисы докладов школы-семинара "Устройства акустоэлектроники", г. Москва. – 1988. – С. 5.
- A30. Груздев, А.В. Исследование шумовых свойств активных пьезокристаллических устройств на ПАВ / А.В. Груздев, В.Д. Купцов, В.С. Усов // Техника средств связи, сер. Общетеchnическая. – 1990. – № 1. – С.104-113.
- A31. Валюхов, В.П. Многомодовая волоконно-оптическая линия для передачи сигнала

- водородного стандарта частоты / В.П. Валюхов, О.И. Котов, В.М. Николаев, В.Д. Купцов, Л.Б. Лиокумович, О.Л. Марусов, А.В. Вытнов, С.Г. Смоленцев // Техника средств связи, сер. Техника проводной связи. – 1992. – № 4. – С.79-82.
- A32. А.С. №1411918 СССР. МПК Н 03 F 1/42. Усилитель мощности высокой частоты / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, В.Н. Рыжевнин, В.Н. Серов, В.С. Усов (СССР); заявит. ЛПИ им. М.И. Калинина. – № 4164894/24-09; заявл. 30.12.86, опубл. 23.07.88, Бюлл. №27. – 5с.
- A33. А.С. №1437961 СССР. МПК Н 03 В 11/10. Формирователь радиоимпульсов / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, В.Н. Рыжевнин, В.Н. Серов, В.С. Усов (СССР); заявит. ЛПИ им. М.И. Калинина. – № 4164895/24-09; заявл. 30.12.86, опубл. 15.11.88, Бюлл. №42. – 6с.
- A34. А.С. №1635246 СССР. МПК Н 03 F 1/42. Широкополосный усилитель / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, Ю.А. Волков, О.А. Нестеров, В.Н. Рыжевнин, В.Н. Серов (СССР); заявит. ЛПИ им. М.И. Калинина. – № 4699981/09; заявл. 20.04.89, опубл. 15.03.91, Бюлл. №10. – 7с.
- A35. А.С. №1644409 СССР. МПК Н 03 F 1/42. Широкополосный усилитель / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, О.А. Нестеров, В.Н. Серов (СССР); заявит. ЛПИ им. М.И. Калинина. – № 4700888/09; заявл. 20.04.89, опубл. 23.04.91, Бюлл. №15. – 6с.
- A36. Валюхов, В.П. Фотоприемные устройства с повышенным динамическим диапазоном для ВОЛС / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, В.Н. Рыжевнин // Тезисы докладов 20-ой отраслевой (МПСС) научно-технической конференции "Интегральные оптические сети связи", г. Ленинград. – 1989. – С. 23.
- A37. Валюхов, В.П. Гибридно-пленочная интегральная микросхема быстродействующего возбуждителя акустооптического модулятора / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, В.Н. Рыжевнин // Тезисы докладов 20-ой отраслевой (МПСС) научно-технической конференции "Интегральные оптические сети связи", г. Ленинград. – 1989. – С. 28.
- A38. Купцов, В.Д. Оптимизация динамического диапазона акустоэлектронных устройств / В.Д. Купцов, В.С. Усов // Труды конференции "Акустоэлектронные устройства обработки информации на ПАВ", г. Черкассы. – 1990. – С. 291-292.
- A39. Валюхов, В.П. Гибридно-пленочные фотоприемные устройства для волоконно-оптических телевизионных каналов связи / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Тезисы докладов межрегиональной научно-технической конференции "Элементы и узлы современной приемной и усилительной техники", г. Ужгород. – 1991. – С. 32-33.
- A40. Валюхов, В.П. Гибридно-пленочный фотоприемный модуль с большим динамическим диапазоном для телевизионного волоконно-оптического канала / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Волоконно-оптическая техника. – 1993. – вып.2. – С. 32-34.

- A41. Валюхов, В.П. Применение фильтров на поверхностных акустических волнах в системах передачи телевизионного изображения / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Конверсия. – 1995. – № 11. – С. 32-33.
- A42. Валюхов, В.П. Опыт создания элементной базы приемно-усилительных трактов широкого применения/В.П. Валюхов, В.Д. Купцов//Российская научно-техническая конференция «Инновационные наукоемкие технологии для России»: тезисы докладов, Часть 1. – 1995.–5с.
- A43. Валюхов, В.П. Разработка миниатюрных гибридно-пленочных приемо-передающих трактов для систем оптической связи / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Российская научно-техническая конференция «Инновационные наукоемкие технологии для России»: тезисы докладов, Часть 1. – 1995. – 16 с.
- A44. Валюхов, В.П. Миниатюрный гибридно-пленочный оптический модем / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов //Вторая Всероссийская научно-практическая конференция. Высшая школа России: «Конверсия и приоритетные технологии», Москва: Каталог выставки. –1996. – С. 4.
- A45. Валюхов, В.П. Разработка миниатюрных гибридно-пленочных приемо-передающих трактов волоконно-оптических систем передачи информации / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Отчет за период 01.01.94 по 31.12.96 по программе «Конверсия и высокие технологии 1994-1996 г.». – 1996. – 19 с.
- A46. Валюхов, В.П. Миниатюрный телевизионный волоконно-оптический модуль / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Тезисы докладов III межведомственной научно-технической конференции «Проблемные вопросы сбора, обработки и передачи информации в сложных радиотехнических системах», г. Пушкин. – 1997. – С. 229.
- A47. Валюхов, В.П. Разработка и выпуск опытной партии миниатюрных телевизионных волоконно-оптических модемов для дуплексной высококачественной передачи полного цветового сигнала со звуковым сопровождением для видеоконференцсвязи (Модем-2) / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Отчет по проекту ИНТП «Трансферные технологии, комплексы и оборудование», СПб. – 1998. – 45 с.
- A48. Валюхов, В.П. Разработка миниатюрных гибридно-пленочных приемо-передающих трактов волоконно-оптических систем передачи информации / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // ОТКТ по НИОИР по НТП «Конверсия и высокие технологии», СПб. – 2000. – 33 с.
- A49. Валюхов, В.П. Опыт разработки миниатюрных приёмо-передающих трактов для радиотехнических систем широкого применения / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Юбилейный сборник СПбГТУ, посвященный 100-летию. – 1999. –14 с.
- A50. Валюхов, В.П. Разработка миниатюрных гибридно-пленочных приемо-передающих трактов волоконно-оптических систем передачи информации (Волокно-1) / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Заключительный отчет по НИР и ОКР. НТП «Конверсия и высокие технологии

1997-2000 г.г.». – 2000. – 25 с.

- A51. Валюхов, В.П. Разработка и выпуск опытной партии сверхчувствительных приборов для обнаружения и определения концентрации высокотоксичных химических и взрывчатых веществ в окружающей среде / В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // Отчет по межвузовской НТП «Прецизионные технологии и системы». – 1999. – 41с.
- A52. Андреева, Е.И. Волоконная оптика в системах видеонаблюдения и охранной сигнализации / Е.И. Андреева, В.П. Валюхов, В.Д. Купцов, Л.В. Пономарев // Сети –2000.–№3. – С. 52-56.
- A53. Kjandzhetsian, R.A. Development and creation of automatic highly sensitive gas analyzers based on molecular condensation nucleus effect to detect dangerous substances / R.A. Kjandzhetsian, V.J. Katelevski, V.P. Valjuchov, S.V. Demin, V.D. Kuptsov, L.M. Vinogradsky // Proc. of ISMTII-2009. ISTC Special Session. – 2009. – P. 51-54.
- A54. Рыбин, Е.Н. Термодинамическое соотношение для расчета нуклеации пересыщенного пара на молекулярных ядрах конденсации / Е.Н. Рыбин, В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // В сборнике: На стыке наук. Физико-химическая серия, II Международная научная Интернет-конференция: материалы конференции, г. Казань. – 2014. – С. 102-106.
- A55. Рыбин, Е.Н. Моделирование нуклеации молекул ДЭГСа на молекулярных ядрах конденсации FeO / Е.Н. Рыбин, В.П. Валюхов, В.Д. Купцов // В сборнике: На стыке наук. Физико-химическая серия, II Международная научная Интернет-конференция: материалы конференции, г. Казань. – 2014. – С. 94-101.
- A56. Купцов, В.Д. Рассеяние лазерного излучения молекулярными ядрами конденсации / В.Д. Купцов, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов, Е.Н. Рыбин // Труды конференции "Лазеры. Измерения. Информация", г. Санкт-Петербург. – 2014. – С. 110.
- A57. Купцов, В.Д. Система регистрации и расчета проникающего рентгеновского излучения / В.Д. Купцов, Я.С. Маркелов // Сборник трудов XIII международной конференции компании National Instruments - NIDays 2014 «Инженерные приложения на базе технологий National Instruments – 2014», г. Москва. – 2014. – С. 302-304.
- A58. Купцов, В.Д. Новая технология извлечения природных алмазов в кусках кимберлита / В.Д. Купцов, В.П. Валюхов, В.В. Новиков, В.А. Ольховой // Труды СПбГТУ. – 2008. – № 507. – С. 98-100.

Цитируемая литература:

1. Гауэр, Д. Оптические системы связи / Д. Гауэр. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
2. Heker, S.F. Video transmission in optical fiber communication systems using pulse frequency modulation / S.F. Heker, G.J. Herskowitz, H. Grebel, H. Wichansky // IEEE transaction on communication. – 1988. – Vol. 36. – № 2. – P. 191-194.

3. Багдасарян, А.С. Устройства селекции частоты на ПАВ. Физико-технические принципы построения / А.С. Багдасарян, Т.В. Сеницына // *Электроника*. – 2011. – Vol. 110. – № 4. – С. 38-44.
4. Лиокумович, Л. Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Часть 2. Волоконно-оптический чувствительный элемент / Л.Б. Лиокумович. – СПб.: Издательство СПбГПУ, 2007. – 110 С.
5. Кателевский, В.Я. Автоматические газоанализаторы санитарно-гигиенического контроля содержания паров люизита и иприта / В.Я. Кателевский, Р.А. Кянджециан, Д.А. Кобышев, С.Н. Соловьёв, В.П. Валюхов, С.В. Дёмин // *Российский Химический Журнал*. – 2010. – т. LIV. – № 4. – С. 107-114.
6. Ключев, В.В. Рентгентехника: Справочник. В 2-х кн. Кн.1 / В.В. Ключев, Ф.Р. Соснин, В. Аертс и др. // Под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
7. Personic, S.D. Receiver design for digital fiber optic communication system / S.D. Personic // *Bell system technical journal*. – 1973. – Vol. 52. – P. 843-886.
8. Personic, S.D. Receiver design for digital fiber systems / S.D. Personic // *Proc. IEEE*. – 1977. – Vol. 65. – P. 1670-1678.
9. Мурадян, А.Г. Системы передачи информации по оптическому кабелю / А.Г. Мурадян, С.А. Гинзбург. – М.: Связь, 1980. – 154 с.
10. Крупина, В.Л. Инженерная методика расчета порога чувствительности приемных оптоэлектронных модулей в цифровых световодных системах передачи информации / В.Л. Крупина // *Техника средств связи. Серия ТПС*. – 1985. – № 1. – С. 11-19.
11. Крупина, В.Л. Оптимизация полосы пропускания приемных устройств волоконно-оптических систем передачи / В.Л. Крупина // *Техника средств связи. Серия ТПС*. – 1990. – № 2. – С. 40-46.
12. Goell, J.E. Input amplifiers for optical PCM receivers / J.E. Goell // *Bell Syst. Tech. J.* – 1974. – Vol. 53. – № 9. – P. 1771.
13. Smith, R.G. Receiver design for optical fiber communication systems / R.G. Smith, S.D. Personic // *Topics in Applied Physics*. – N.Y.: Springer – Verlag. – 1982. – Vol. 39. – P. 129.
14. Muoi, T. Receiver design for high-speed optical fiber systems / T. Muoi // *J. of lightwave technology*. – 1984. – Vol. LT-2. – № 3. – P. 243-267.
15. Зайцев, Д.Ф. Оптимизация шумовых характеристик предусилителей для быстродействующих фотоприемников волоконно-оптических линий связи / Д.Ф. Зайцев // *Радиотехника и электроника*. – 1985. – т. 30. – № 8. – С. 1630-1633.
16. Зайцев, Д.Ф. Аналитический расчет и оптимизация чувствительности быстродействующих цифровых и аналоговых фотоприемных устройств для волоконно-оптических линий связи /

- Д.Ф. Зайцев // Радиотехника и электроника. – 1988. – т. 33. – № 3. – С. 612-619.
17. Шевцов, Э.А. Фотоприемные устройства волоконно-оптических линий связи / Э.А. Шевцов, М.Е. Белкин. – М.: Радио и связь, 1992. – 224 с.
 18. Чернов, Е.И. Прецизионные фотоприемные устройства на основе фотодиодов, Часть II / Е.И. Чернов // Обзоры по электронной технике. Серия 4: Электроракуумные и газоразрядные приборы. – 1989. – № 1420. – 52 с.
 19. Pittet, P. Noise Modeling For Charge Amplification and Sampling / P. Pittet, G.N. Lu, L. Quiquerez // Electronics, Circuits and Systems, ICECS apos. – 2006. – P. 9-12.
 20. Кувалдин, Э.В. Системный подход к энергетическому расчету фотометрического прибора / Э.В. Кувалдин // Научное приборостроение. – 2003. – т. 13. – № 2. – С. 52-56.
 21. Беляев, С.П. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / С.П. Беляев, Н.К. Никифорова, В.В. Смирнов, Г.И. Щелчков. – М: Энергоиздат, 1981. – 118 с.
 22. Толстая, Н.В. Особенности конструкции оптико-электронных аэрозольных спектрометров и их влияние на точностные характеристики приборов / Н.В. Толстая, В.Л. Филиппов, В.Н. Казаков // Вестник КГЭУ: научно-технический журнал. – 2010. – № 2(5). – С. 22-35.
 23. Коган, Я. И. Молекулярные ядра конденсации / Я.И. Коган // Докл. АН СССР. – 1965. – т. 161. – № 2. – С. 388 - 392.
 24. Кянджециан, Р.А. Аналитические возможности детектора молекулярных ядер конденсации для мониторинга атмосферы производств по переработке и уничтожению химического оружия / Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов, С.В. Демин, В.П. Капашин, А.Б. Полков, А.В. Майоров // Рос. хим. журнал. – 2002. – т. 46. – С. 20-30.
 25. Маренков, О.С. Таблицы и формулы рентгеноспектрального анализа: Методические рекомендации / О.С. Маренков. – Л.: Машиностроение, 1982. – № 3. – 101 с.
 26. Zeijl, Paul T.M. Noise and dynamic range optimization of SAW transversal filters / Paul T.M. Zeijl// IEEE trans. on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 1992. – Vol. 39, № 4. – P. 519-524.
 27. Агаханян, Т.М. Линейные импульсные усилители / Т.М. Агаханян. – М.: Связь, 1970. – 472с.