

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



Информационные системы

Информатика

Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы

Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и наноэлектроника

Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества



Редакционная коллегия

Сигов А.С. Главный редактор журнала, Президент Московского технологического университета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Кудж С.А. Ректор Московского технологического университета, д.техн.н., профессор, e-mail: rector@mirea.ru

Большаков А.К. Директор Института инновационных технологий и государственного управления, к.экон.н., доцент, e-mail: bolshakov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.хим.наук, Институт тонких химических технологий, e-mail: buslaeva@mirea.ru

Герасин А.Н. Директор Института управления и стратегического развития организаций, д.экон.н., профессор, e-mail: gerasin_an@mgupr.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.хим.наук, доцент, Институт тонких химических технологий, e-mail: esipova@mirea.ru

Жуков Д.О. Директор Института информационных технологий, д.техн.наук, профессор, e-mail: zhukov_do@mirea.ru

Карнаков В.В. Директор Института комплексной безопасности и специального приборостроения, к.техн.наук, e-mail: karnakov_vv@mgupr.ru

Кимель А.В. К.ф.-м.н., Университет г. Наймеген (Нидерланды) e-mail: a.kimel@science.ru.nl

Кондратенко В.С. Директор Физико-технологического института, д.техн.наук, профессор, e-mail: kondratenko_vs@mgupr.ru

Кузнецов В.В. Советник ректората Московского технологического университета, к.техн.н., доцент, e-mail: kuznetsov@mirea.ru

Куликов Г.В. Директор Института радиотехнических и телекоммуникационных систем, д.техн.н., профессор, e-mail: kulikov@mirea.ru

Перно Филипп Проректор по научной работе Высшей инженерной школы, профессор, г. Лилль, Франция, e-mail: philippe.pernod@ec-lille.fr

Романов М.П. Директор Института кибернетики, д.техн.н., профессор, e-mail: m_romanov@mirea.ru

Савиных В.П. Президент МИИГАиК, член-корреспондент РАН, д.техн.н., профессор, e-mail: president@miigaik.ru

Скотт Джеймс. Профессор, Член Лондонского Королевского общества, Университет г. Кембридж, Великобритания, e-mail: jamesscott@acm.org

Цветков В.Я. Советник ректората Московского технологического университета, д.техн.н., профессор, e-mail: cvj2@mail.ru

Редакция

Сигов А.С. Главный редактор журнала, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.хим. наук, e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.хим.н., доцент, e-mail: esipova@mirea.ru

Колосов Д.Э. Секретарь, к.техн.н., e-mail: letters@mirea.ru

Семерня Л.Г. Технический редактор, e-mail: semernya@mirea.ru

Середина Г.Д. Зав. редакцией, к.техн.н., e-mail: seredina@mirea.ru

Цветков В.Я. профессор, д.техн.н., e-mail: cvj2@mail.ru

Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88) e-mail: seredina@mirea.ru

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ****R U S S I A N T E C H N O L O G I C A L J O U R N A L**

СОДЕРЖАНИЕ

Сигов А.С. К читателю*Белкин М.Е., Кудж С.А., Сигов А.С.* Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиодифракционной технологии

4

Цюцзе Чэнь. Научно-техническое сотрудничество между КНР и РФ: состояние, проблемы, перспективы

21

*МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**Юрасов А.Н.* О распределении по размерам гранул в нанокompозитах

25

*СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**Барченев В.Г., Барченев Г.В., Битюков В.К., Кутепов В.К.* Межканальная корреляция полезных сигналов и сравнительный анализ эффективности различных способов объединения каналов

28

Денисов В.Е. Анализ искажений высокочастотных импульсных акустических сигналов с линейной частотной модуляцией в гидроакустическом канале связи

34

*АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ**Титов А.А., Гарипов В.К., Костромин М.А.* Измерение перемещения объектов гетеродинным методом

42

*ЭКОНОМИКА НАУКОЕМКИХ И ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ПРОИЗВОДСТВ**Гавриленко Т.Ю., Проворова И.П.* Сетевая экономика как феномен информационного общества

53

Кудрявцева И.Г. Эпоха массовой кастомизации в современной экономике

62

Тумин В.М., Костромин П.А., Вихрова А.С. Зарубежная и отечественная практика управления устойчивым развитием промышленных предприятий на основе повышения информационной прозрачности ведения бизнеса

71

Правила для авторов 2016

86

К ЧИТАТЕЛЮ



Многоуважаемый читатель!

Вам представлен первый номер международного журнала, призванного освещать результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

В нашей стране уже несколько лет осуществляется реформирование Академии наук, оптимизируется сеть вузов, разворачивается инновационная деятельность. В плане этих преобразований произошла реорганизация МИРЭА, МГУПИ, МИТХТ им. М.В. Ломоносова и ряда научных учреждений, в результате возник Московский технологический университет, ведущий подготовку кадров и выполняющий научные исследования по широкому спектру направлений. Руководство университета приняло решение о выпуске нового журнала – Российского технологического журнала – на базе издававшегося прежде «Вестника МГТУ МИРЭА». На обложке вы видите рубрикатор нашего журнала. Мы постарались сделать его достаточно обширным, чтобы открыть возможности публикации материалов по всем вопросам сферы высоких технологий и их научной «поддержки».

Редакционная коллегия с благодарностью примет любые конструктивные предложения по совершенствованию журнала и повышению его научного уровня.

Ждем новых результатов ваших исследований.

Главный редактор

А.С. Сигов

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

М.Е. Белкин, профессор
С.А. Кудж, д.т.н., ректор
А.С. Сигов, д.ф.-м.н., президент

*Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: rector@mirea.ru*

Рассматриваются фундаментальные и практические преимущества внедрения нового междисциплинарного направления – радиопоники (микроволновой поники) – в разработки современных и перспективных радиосредств двойного назначения. Главные преимущества заключаются в повышении рабочей частоты до терагерцевого диапазона, расширении полосы обработки до нескольких гигагерц, улучшении электромагнитной совместимости и массогабаритных характеристик. Дается классификация компонентной базы радиопоники, анализируется современный уровень мирового развития радиопоники с акцентом на ее второй этап: интегральную радиопонику. Кратко описываются работы в области радиопоники, выполненные и ведущиеся в Московском технологическом университете, включая результаты моделирования и экспериментальных исследований, обучение и ближайшие задачи созданного научно-технологического центра «Интегральная радиопоника».

Ключевые слова: радиопоника, терагерцевый диапазон, компьютерное моделирование, радиопоничные интегральные схемы, кремниевая поника, поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором.

NOVEL PRINCIPLES OF MICROWAVE BAND RADIOELECTRONIC DEVICES DESIGN WITH THE USE OF MICROWAVE PHOTONICS TECHNOLOGY

M.E. Belkin,
S.A. Kudzh,
A.S. Sigov

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: rector@mirea.ru*

There are highlighted fundamental and practical advantages referred to introduction of the new interdisciplinary scientific and technological direction, that is, microwave photonics, in modern and perspective radio means of a dual purpose. The main advantages consist in increase of operating frequency to terahertz range, expansion of a processing band to several gigahertz, improvement of electromagnetic compatibility and mass-volume characteristics. A classification of the component base of microwave photonics is proposed, the modern level of world development of microwave photonics with emphasis on its second stage, which is integrated microwave photonics, is analyzed. The works in the field of microwave photonics that have been performed or being conducted by research groups at Moscow Technological University, including results of modeling and research

projects, training, and the nearest tasks of the established Scientific and Technological Center «Integrated Microwave Photonics» are briefly described.

Keywords: microwave photonics, terahertz band, computer modeling, microwave integrated circuits, silicon photonics, VCSEL.

Введение

Анализ современного мирового развития радиоэлектронных систем СВЧ-диапазона показывает, что наиболее эффективным путем решения стратегически важной проблемы улучшения пропускной способности, массогабаритных и стоимостных характеристик, энергопотребления, надежности современных радиоэлектронных систем (РЭС) СВЧ-диапазона гражданского и военного назначений является применение для формирования и обработки сигналов методов и подходов радиофотоники (микроволновой фотоники) – нового междисциплинарного направления, созданного на стыке СВЧ-радиоэлектроники и фотоники. Реализация данного подхода в РЭС СВЧ-диапазона, помимо значительного улучшения вышеуказанных технико-экономических показателей, дополнительно приведет к улучшению таких важных характеристик РЭС двойного назначения, как электромагнитная совместимость, стойкость к внешним воздействиям (в том числе, преднамеренным), экологичность.

Актуальность и необходимость скорейшего внедрения (промышленного освоения) фотонной и радиофотонной технологий в нашей стране определяются:

- приоритетом направления радиофотоника для технологического развития отрасли электронной и радиоэлектронной промышленности в Государственной Программе Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 гг.» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2012 г. № 2396-р);
- задачами создания критических и базовых промышленных технологий, задачами создания электронной компонентной базы для обеспечения выполнения Государственной программы вооружения–2020, в том числе, технологической независимости и импортозамещения для нужд стратегических отраслей в соответствии с Федеральной программой (ФЦП) «Развитие ВПК на 2012–2020 гг.»;
- возможностью преодоления технических, технологических, ресурсных, экологических и других ограничений в отечественной радиоэлектронной промышленности;
- отсутствием широкой возможности воспользоваться существующими решениями, методами, технологиями, развитыми в зарубежных странах.

Устройства и узлы радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона на базе фотонной и радиофотонной технологий, в том числе устройства обработки радиосигналов, а также радиоэлектронные системы двойного назначения с применением радиофотоники широко исследуются и разрабатываются в университетах и научных секторах крупных фирм промышленно развитых зарубежных стран [1, 2]. Однако данное, важное для оборонного потенциала страны, направление очень слабо развивается в России, причем уже наметилось значительное отставание. Для поиска путей и создания условий его преодоления в последние годы при НТС ВПК создана специальная рабочая группа по радиофотонике, которой разработана Программа развития отечественной радиофотоники на 2016–2025 гг. Кроме того, Фондом перспективных исследований ВПК разработана Дорожная карта по фотонике и радиофотонике. Реализация намеченных планов в настоящее время осуществляется целым рядом университетов, учреждений Российской академии наук и предприятий радиоэлектронной промышленности.

Наш университет, имеющий многолетний опыт исследований и разработок в области микроволновой фотоники и сверхвысокочастотной оптоэлектроники [3], также принимает активное участие в этой деятельности. Так, в 2015 г. была выполнена научно-исследовательская работа «Фотон-комплекс», в которой проведен комплексный анализ необходимых мероприятий

для становления и развития научно-технического направления – нанофотоника (радиофотоника). По инициативе МИРЭА, Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в конце 2014 г. был объявлен конкурс ориентированных фундаментальных исследований по теме «Фундаментальные проблемы новой компонентной базы радиофотоники и функциональных систем на ее основе». В рамках его в настоящее время выполняются 17 проектов, включая проект от нашего университета, связанный с поиском оптимальных путей моделирования радиофотонного диаграммообразующего устройства сверхширокополосной радиоэлектронной системы СВЧ-диапазона. Дополнительно в университете предложены и реализованы пионерские для нашей страны инициативы, связанные с переподготовкой инженерных кадров в области радиофотоники и развитием интегрального подхода к построению радиофотонной аппаратуры.

В данной статье рассматриваются фундаментальные и практические преимущества внедрения радиофотоники, дается классификация компонентной базы радиофотоники, анализируется современный уровень мирового развития микроволновой фотоники с акцентом на ее второй этап: интегральную радиофотонику. Кратко описываются работы в области радиофотоники, выполненные и ведущиеся в Московском технологическом университете, включая результаты моделирования и экспериментальных исследований, обучение и ближайшие задачи созданного научно-технологического центра «Интегральная радиофотоника».

1. Фундаментальные и практические преимущества внедрения радиофотоники

В современном понимании фотоника означает обширную область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Одним из новых направлений фотоники является сверхвысокочастотная оптоэлектроника [3], появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. В развитие СВЧ-оптоэлектроники в последнее время используется новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники.

Цели и задачи РФ: исследования и разработки сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне, их применения в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также создание активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

К фундаментальным преимуществам радиофотонной технологии, позволяющим совершенствовать характеристики радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона, можно отнести следующие:

Базирующиеся на фундаментальных свойствах носителей информации: фотон – безмассовая элементарная частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Это обеспечивает:

- повышенное быстродействие (до десятков фемтосекунд);
- расширенную полосу пропускания (до терагерцевого диапазона).

В результате улучшаются тактико-технические показатели традиционных узлов формирования и обработки СВЧ сигналов: генератора, преобразователя частоты, линии задержки, фильтра и т.д.

Базирующиеся на свойствах среды распространения: кварцевое оптическое волокно –

- малые потери при передаче ($<0,2$ дБ/км) и независимость их от частоты модуляции в радиочастотном диапазоне (рис. 1);

- расширенная рабочая полоса частот (до 15 ТГц);
- гораздо лучшие массогабаритные характеристики (волоконный кабель: масса 1,7 кг/км, диаметр 250 мкм; коаксиальный кабель: масса 560 кг/км, диаметр 10 мм);
- нечувствительность к электромагнитным наводкам (диэлектрик): улучшение электромагнитной совместимости внутри системы, повышение имитостойкости аппаратуры;

• значительно лучшие фазотемпературные характеристики: фазовая стабильность и возможность когерентного приема и обработки сигналов (рис. 2). Относительное изменение задержки на единицу длины и градус температуры для волокна без покрытия составляет $8 \cdot 10^{-6}$ [4], если оно не прикреплено механически к другому материалу с большим коэффициентом температурного расширения.

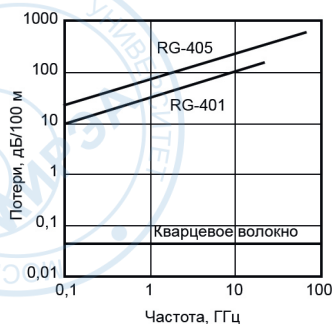


Рис. 1. Потери в функции от частоты, включая только потери при распространении в коаксиальном кабеле типов RG-401, RG-405 (увеличиваются пропорционально квадратному корню от частоты) и в оптическом волокне.

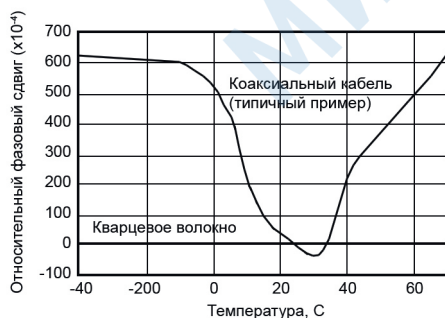


Рис. 2. Типичная температурная зависимость относительного фазового сдвига для коаксиального кабеля и оптического волокна.

В результате улучшаются тактико-технические показатели и характеристики передачи радиосредств.

Принципиальным недостатком использования радиофотонной технологии в РЭС является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала. Тем не менее, их влияние в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне. В подтверждение этого на рис. 3 приведены расчетные интервальные характеристики полных потерь, из которых следует преимущество использования фотоники при длине линии передачи более 100 м на частоте радиосигнала 1 ГГц и более 30 м на частоте 10 ГГц. При необходимости передачи радиосигналов более высоких частот баланс потерь достигается при еще меньшей длине линии.

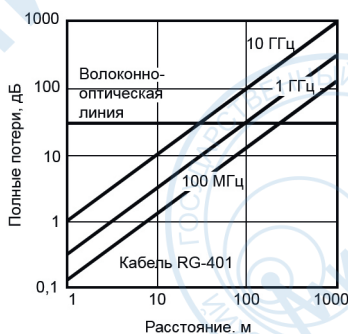


Рис. 3. Расчетные интервальные характеристики линий передачи на базе оптического волокна и коаксиального кабеля.

Использование вышеуказанных фундаментальных достоинств обеспечивает конкретные практические преимущества, приводящие к возможности улучшения ключевых тактико-технических характеристик (ТТХ) РЭС, что иллюстрируется на примере радиолокационной системы на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР).

- Возможность работы с пространственным (сейчас до 7 сердцевин в одном волокне (рис. 4), в дальнейшем до 19 сердцевин) и/или спектральным (до 80 оптических несущих по одной сердцевине с шагом 50 ГГц) уплотнением: передача с терабитными скоростями, улучшение массогабаритных характеристик и упрощение схемы диаграммообразующего устройства (ДОУ), многофункциональное (локация, радиоэлектронная борьба РЭБ, связь, мониторинг), многодиапазонное (от L- до K_a-диапазона) функционирование, связь наземной и бортовой аппаратуры по одному кварцевому волокну (например, для 1500-элементной АФАР) Широкополосность: расширение мгновенной полосы обработки (сейчас до 2–3 ГГц, в будущем до 10 ГГц): повышение скорости и пропускной способности систем обработки.

- Широкий динамический диапазон тракта приема: повышение скрытности функционирования РЭС за счет работы на фоне сильных сигналов и помех.

- Малые потери и дисперсия в оптическом волокне: высококачественная передача цифровых и аналоговых СВЧ сигналов между разнесенными постами аппаратуры, что упрощает размещение аппаратуры на носителях и позволяет создавать когерентный прием в системах распределенной структуры.

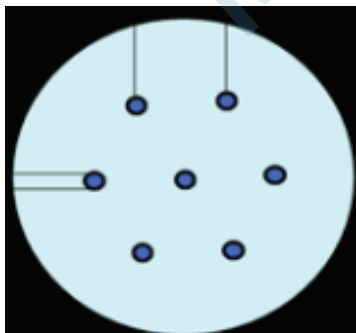


Рис. 4. Поперечное сечение современного 7-сердцевинного оптического волокна [5].

2. Классификация компонентной базы радиофотоники

Предыдущее рассмотрение позволяет ввести следующие определения для чисто фотонного и радиофотонного устройств.

Фотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона.

Радиофотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио- и оптического диапазонов.

С этих позиций компонентную базу радиофотоники и строящиеся на их основе функциональные элементы и устройства можно разделить на пять типов [6]. Их классификация представлена на рис. 5, а-д.

Как видно из рис. 5, приборы и элементы с прямым взаимодействием СВЧ и оптического излучений включают:

- оптико-электрический преобразователь (рис. 5, а), например, полупроводниковый фотодиод;
- электрооптический преобразователь (рис. 5, б), например, полупроводниковый лазер;
- датчик СВЧ-сигнала с оптическим управлением (рис. 5, в), например, оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов;
- преобразователь оптического сигнала (рис. 5, г), например, оптический модулятор, лазерный усилитель;
- преобразователь СВЧ-сигнала (рис. 5, д), например, СВЧ-усилитель, коэффициент усиления ко-

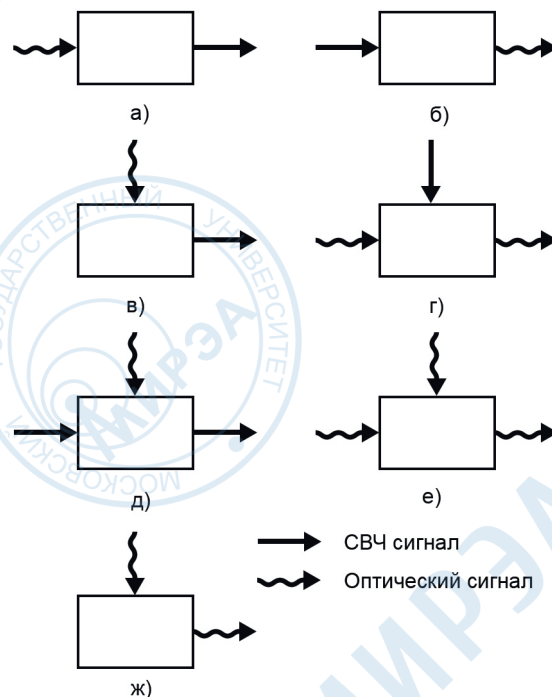


Рис. 5. Классификация компонентной базы и функциональных элементов и устройств с позиций радиофотоники.

того регулируется оптическим сигналом, оптоэлектронная схема задержки, оптоэлектронный смеситель.

Общая отличительная черта всех вышеперечисленных приборов и функциональных элементов заключается в работе в С (1530–1565 нм) и/или L (1565–1625 нм) спектральных диапазонах по классификации МСЭ–Т. Основными причинами такого выбора являются самые низкие потери в кварцевом волокне и самая широкая рабочая спектральная полоса, что, например, позволяет эффективно заменить обычно применяемый в АФАР набор переключаемых линий задержек на базе большого числа СВЧ линий передачи на многоволновую передачу с спектральным разделением каналов по одной общей волоконно-оптической линии. Кроме того, только в указанных диапазонах существует уникальная возможность компенсации потерь за счет экономичных и высокотехнологичных волоконных усилителей. Устройства данного типа, основанные на чисто оптическом взаимодействии, появились в процессе развития волоконно-оптических систем и также могут быть эффективно применены в радиофотонной аппаратуре. К ним относятся: преобразователь оптического сигнала с оптической накачкой (рис. 5, е), например, эрбиевый, рамановский и бриллюэновский волоконные усилители, датчик оптического сигнала с оптической накачкой (рис. 5, ж), например, эрбиевый волоконный генератор.

3. Общий принцип построения и современный уровень мирового развития

В последние годы разработчики РЭС гражданского и военного назначений все большее внимание уделяют радиофотонному принципу построения, основанному на достижениях СВЧ оптоэлектроники и фотоники [1–3, 6]. Общая суть его иллюстрируется с помощью рис. 6. На рисунке входной радиосигнал СВЧ диапазона посредством электрооптического преобразования (ЭОП) конвертируется в оптический диапазон. Модулированный оптический сигнал при помощи волоконно-оптических либо интегрально-оптических узлов и устройств соответствующим образом задерживается, обрабатывается либо просто передается в удаленную точку аппаратуры, где осуществляется обратное оптико-электрическое преобразование (ОЭП) в радиодиапазон.

Анализ результатов исследований и разработок показывает, что использующая радиофотонный принцип радиоэлектронная аппаратура должна функционировать в четырех частот-

Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии

ных диапазонах: в полосах модулирующих, промежуточных, несущих частот радиодиапазона (включая СВЧ- и КВЧ-диапазоны) и в полосе оптического диапазона (точнее, ближнего ИК-диапазона). В данной сверхширокой полосе (8 декад) к компонентной базе и схемотехническим принципам построения аппаратуры предъявляются самые разнообразные, часто противоречивые требования, что делает весьма привлекательным для упрощения схем узлов широкое использование радиофотонных принципов, основанных на прямом взаимодействии СВЧ и оптического излучений, а также фотонных интегральных схем (ФИС).

Объем исследований в области интегральной фотоники для телекоммуникационных и радиолокационных применений постоянно увеличивается на протяжении последних трех десятилетий. Так, считается, что в настоящее время мировым научным сообществом, в общем, закончен первый этап исследований и разработок аппаратуры РЭС с использованием объемной радиофотонной компонентной базы и волоконных узлов и происходит переход ко второму этапу ее развития с применением интегральной радиофотонной технологии. Данная технология так же, как когда-то микроволновая фотоника с использованием объемных волоконно-оптических компонентов и узлов, развивается на базе достижений в области телекоммуникаций, а именно, для больших ФИС исследован целый ряд материалов. Уже прошли длительное изучение полупроводники III–V групп, в частности, структуры на основе GaAs и InP [7, 8]. Материалы IV группы, такие как Si и Ge, также имеют большой потенциал, как в стандартных телекоммуникационных спектральных полосах, так и в среднем ИК-диапазоне [9].

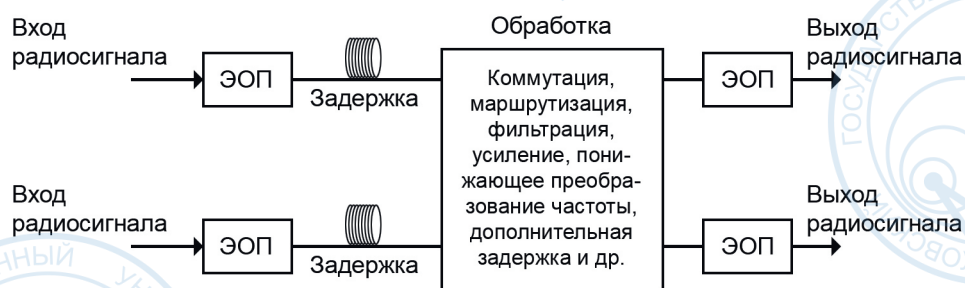


Рис. 6. Радиофотонный принцип построения РЭС.

В табл. 1 показан сравнительный анализ основных достоинств и недостатков ФИС на базе четырех наиболее известных материалов подложек [10]. С учетом всех возможностей двумя ведущими платформами для крупномасштабной оптической интеграции считаются ФИС на основе кремния и фосфида индия.

Есть разные мнения среди экспертов, какие подложки, Si или InP, являются наиболее подходящими для фотонной интеграции [9, 10]. Подложки InP более привлекательны сегодня для лазеров и активных ФИС. Так, в современной телекоммуникационной отрасли используется больше ФИС на основе InP, чем на кремниевых подложках. Тем не менее некоторые эксперты считают, что фотонная интеграция на основе кремния является более эффективным подходом в долгосрочной перспективе [9].

Кремниевая фотоника имеет явные преимущества по сравнению с InP, как, например, низкие потери волноводов для маршрутизации и межсоединений, самая развитая инфраструктура для обработки и совместимость с электронными интегральными схемами (табл. 1). Данное направление предлагает также много перспективных возможностей для применений в микроволновой фотонике [10].

Кремниевые волноводы и активные фотонные устройства имеют потенциал, чтобы обеспечить большинство рассмотренных выше преимуществ радиофотонной технологии на базе волоконной оптики для радиочастотных применений, в том числе широкополосность и высокую эффективность. Дополнительные преимущества, предоставляемые кремнием в отличие от традиционных объемных решений, включают уменьшение габаритов, улучшение масшта-

Таблица 1. Сравнение основных существующих платформ интегральной радиофотоники

Материал подложки	Достоинства	Недостатки
Фосфид индия InP	<ul style="list-style-type: none"> Монолитная реализация как активных (лазеры, фотодиоды, модуляторы, оптические усилители), так и пассивных фотонных компонентов. Возможность интеграции с высокоскоростными и СВЧ электронными компонентами. Высокий уровень интеграции и надежность. 	<ul style="list-style-type: none"> Недостаточно развита индустриальная база. Пластины относительно малого диаметра и высокой стоимости. Слабый контраст показателя преломления – сложность создания компактных пассивных компонентов. Высокие оптические потери.
Кремний Si	<ul style="list-style-type: none"> Использование развитой КМОП технологии – экономичность. Высокий контраст показателя преломления – компактные и высококачественные волноводы и резонаторы. 	<ul style="list-style-type: none"> Слабый электрооптический эффект - трудность реализации эффективных модуляторов. Непрямой квантовый переход – только гибридная или гетерогенная интеграция лазеров. Относительно высокие оптические потери, легко возникают дополнительные потери на рассеивание.
Нитрид кремния Si ₃ N ₄	<ul style="list-style-type: none"> Самые низкие потери в интегральном волноводе: создание диаграммообразующих устройств с требуемыми задержками СВЧ сигнала. Наиболее эффективное сопряжение с волокном. Потенциально низкая стоимость. 	<ul style="list-style-type: none"> Невозможна монолитная реализация активных компонентов. Требуется подстройка и температурное управление сложными пассивными схемами.
Ниобат лития LiNbO ₃	<ul style="list-style-type: none"> Сильный электрооптический эффект и относительно низкие потери – внешние модуляторы с полосой в СВЧ-диапазоне. Высокоразвитая технологическая база. 	<ul style="list-style-type: none"> Сложность интеграции с управляющей электроникой. Относительно большие габариты. Невозможна реализация лазеров, фотодетекторов и оптических усилителей.

бируемости в многоканальных применениях, устойчивость к внешним воздействиям в оптических когерентных системах, простота технологии производства и потенциал для интеграции с другими компонентами на уровне чипа.

Однако в настоящее время еще остались серьезные проблемы, не позволяющие немедленно перейти на технологии кремниевой фотоники.

К ним относятся потери при распространении и потери на внутренние и внешние соединения в кристаллах, которые требуют дополнительного изучения. Как указано выше, коэффициенты затухания оптических волокон измеряются в долях децибела на километр, однако аналогичный параметр для кремниевых волноводов – в децибелах на сантиметр и в последнее время в децибелах на метр. Например, типичные потери при распространении в одномодовом волокне 0,2 дБ/км в отличие от потерь в кремнии, которые, как правило, порядка 0,2 дБ/см.

Примеры коэффициентов затухания для различных типов волноводов на основе кремния представлены на рис. 7 [11]. Необходимо отметить сложность точного построения общего сравнительного графика такого рода, поскольку потери зависят от многих конкретных волноводных параметров.

Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии

Они включают в себя материал сердцевины волновода (например, кремний, нитрид кремния или диоксид кремния), толщину сердцевины и тип волноводов (одно- или многомодовый) и т. п.

Следует также отметить, что данные на рис. 7 относятся к различным волноводным технологиям, таким, как нанофотонные кремниевые волноводы, гребневые кремниевые волноводы и кварцевые волноводы с низкими потерями. Тем не менее, тенденция улучшения характеристик передачи является очевидной, и современный рекорд затухания в интегральных волноводах на базе кремния составляет менее 1 дБ/м, что на два порядка меньше по сравнению с первыми результатами.

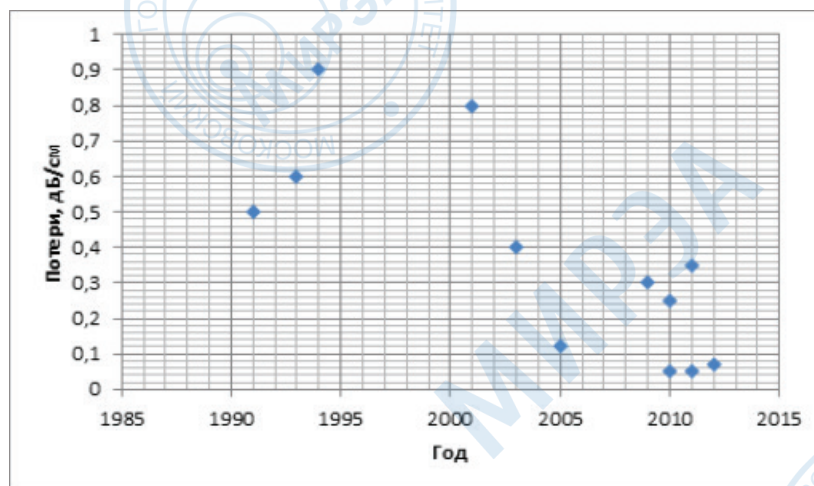


Рис. 7. Примеры коэффициентов затухания для различных типов волноводов на основе кремния [11].

В заключение этого краткого обзора приведем обобщенные по докладом на последней конференции по интегральной фотонике данные [12], характеризующие современный уровень развития производства ФИС в Европе и США.

Европа

Основные участники:

- **European Photonic Industry Consortium – EPIC;**
- **Access Center for Photonics Innovation Solutions – ACT PHAST;**
- **Silicon Photonics Alliance of CEA-LETI, IMEC, VTT, INP, Tyndall National Institute, TNO and CMC Microsystems – EPIXfab.**

Производство:

- На сегодня более 5 тысяч малых и средних предприятий в области фотоники.
- Ежегодный прирост рынка фотоники более 6,5%.
- Прогноз рынка в 2020 г. – 615 млрд. Евро.

США

• В июле 2015 г. принята **Национальная программа по развитию производства фотонных интегральных схем (Integrated Photonics Manufacturing Program)**, срок 5 лет, фонд 610 млн. долларов, координаторы: **U.S. Department of Defense (DoD), Manufacturing Innovation Institute for Integrated Photonics (AIM-Photonics)**. Участвуют 124 промышленные фирмы, некоммерческие организации и университета.

4. Работы в области радиофотоники в Московском технологическом университете

Следуя отмеченным выше мировым и отечественным тенденциям развития радиофотоники, в МИРЭА за последние годы выполнены и продолжают выполняться целый ряд НИОКР по Госконтрактам с Минобрнаукой и Минпромторгом, а также в рамках грантов РФФИ. По результатам исследований и разработок опубликовано 3 монографии и главы в монографии, более 20 статей в отечественной и зарубежной научной периодике, включающей журналы

и материалы ведущих конференций, получено 6 патентов на изобретения и полезные модели. Накопленный опыт позволил в конце прошлого года создать специализированную образовательную программу профессиональной переподготовки «Фотоника и радиофотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона», в рамках которой в настоящее время обучаются сотрудники семи предприятий радиоэлектронной промышленности. Кроме того, в соответствии с описанными выше современными мировыми тенденциями, организован первый в стране научно-технологический центр «Интегральная радиофотоника», включающий дизайн-центр и научно-исследовательскую лабораторию. Ниже кратко описываются основные результаты работ.

Компьютерное моделирование и экспериментальная верификация

Согласно современным представлениям, наиболее эффективным путем сокращения финансовых и временных затрат при продвижении инновационной продукции на рынок является проведение тщательного моделирования ее работы и характеристик с использованием современных систем автоматизированного проектирования (САПР). Особую важность это имеет для электронной компонентной базы с рабочими частотами в СВЧ-диапазоне, где стоимость специализированного измерительного оборудования и экспериментальных работ гораздо выше, чем в более низкочастотных диапазонах. В свете этого, прежде всего, изучены современное состояние в области автоматизированного проектирования и возможности современных САПР по критериям выполнения задач радиофоники [13]. Данные анализа различных САПР, классифицированных по назначению как универсальные и специализированные, представлены в табл. 2.

В результате исследований сделан общий вывод [14], что оптимальное решение задачи моделирования по критериям точности и времени решения компонентов и функциональных

Таблица 2. Современные программные продукты для моделирования функционирования компонентов и узлов радиофоники

Назначение	Наименование/ Разработчик	Объекты моделирования	Методы моделирования
Универсальное	Sentaurus TCAD/ Synopsys	Лазеры, фотодиоды, транзисторы, СВЧ и интегрально-оптические пассивные элементы	BPM, SPICE-модели, FDTD, транспортные модели: дрейфово-диффузионная, термо-диффузионная, гидродинамическая
	Microwave Studio Suit/CST	СВЧ и интегрально-оптические пассивные элементы	Метод конечного интегрирования, волновой метод, метод собственных мод
Специализированное	FIMMWAVE, FIMMPROP, Kallistos, CrystalWave/ Photon Design	Любые пассивные функциональные элементы ФИС	FEM, FDM, FDTD
	APSS/ Apollo Photonics	Любые пассивные функциональные элементы ФИС	BPM, FDTD, СВPM, BPM+FDTD, CMT, MMM
	OptiFDTD, OptiBPM/ Optiwave VPI Photonics/VPI Systems	Пассивные и нелинейные компоненты ФИС Пассивные и активные функциональные элементы, устройства, системы	BPM, FDTD S-матрицы, метод линий передачи, совместное моделирование в частотной и временной областях

Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии

узлов радиофотоники должно основываться на рациональном сочетании структурных (физических и в виде физической эквивалентной схемы ФЭС) и бесструктурных (имитационных) моделей. При этом для расчетов могут быть использованы средства нескольких САПР, например, технологической САПР (TCAD) и электронной САПР (ECAD) [15]. Такой подход назван сквозным проектированием.

С помощью универсальной САПР Sentaurus TCAD фирмы Synopsys проведено моделирование активной компонентной базы радиофотоники: ряда лазерных структур [16–18] с полосой модуляции до 10 ГГц и фотодиодных структур [19, 20] с полосой пропускания до 30 ГГц. Однако, как известно, физическое моделирование не позволяет исследовать характеристики более сложных модулей и устройств. Наиболее распространенным в мире инструментом разработчика компонентной базы, функциональных устройств и систем современной фотоники (рис. 5) являются названные специализированными в табл. 2 оптоэлектронные САПР (OE-CAD). Следуя этому, с помощью VPI Transmission Maker фирмы VPI Systems разработаны модели и проведены модельные эксперименты по базовым радиотехническим устройствам: оптоэлектронному генератору (ОЭГ), преобразователю частоты (смесителю) и схеме задержки сигналов СВЧ-диапазона на основе традиционных лазеров с торцевым излучением (ЛТИ) и с использованием перспективного поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL).

Применение VCSEL в принципе позволяет уменьшить энергопотребление, улучшить экономические характеристики и обеспечить возможность интеграции этих радиофотонных устройств [21, 22]. В качестве примера на рис. 8 приведены структурные схемы ОЭГ на базе ЛТИ (рис. 8, а) и VCSEL (рис. 8, б) [21, 22].

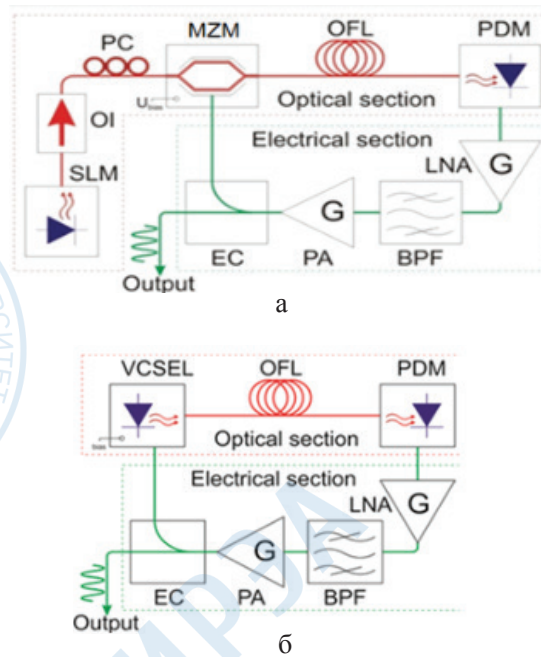


Рис. 8. Структурные схемы разработанных оптоэлектронных генераторов сигналов СВЧ-диапазона на базе лазера с торцевым излучением (а) и VCSEL (б).

Как видно из рис. 8, достоинство ОЭГ на базе VCSEL, помимо вышеуказанных преимуществ самого лазера, состоит в упрощении схемы за счет исключения ее наиболее дорогостоящего элемента – внешнего электрооптического модулятора Маха-Цандера (ММЦ). Однако использование непосредственной модуляции лазера вместо общепринятой внешней модуляции должно принципиально привести к ухудшению основных параметров ОЭГ: полосы перестройки и фазового шума. Работы по моделированию в OE-CAD и экспериментальной верификации обоих вариантов построения ОЭГ [23, 24] позволили получить результаты [25, 26], приведенные в табл. 3. Там же для сравнения даны параметры электронного аналога – современного синтезатора частоты фирмы Analog Devices.

Из табл. 3 явно следует ухудшение перестроечных и шумовых параметров, особенно, вблизи несущей в варианте непосредственной модуляции активного элемента. Тем не менее, даже в этом случае по сравнению с электронным аналогом получается примерно в три раза большая полоса перестройки, а фазовые шумы улучшаются более, чем на 10 дБ, что свидетельствует о перспективности ОЭГ для построения источников прецизионных сигналов СВЧ-диапазона.

Таблица 3. Сравнение параметров оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов на базе внешней и непосредственной модуляции

Параметр	ОЭГ на базе ММЦ [25]	ОЭГ на базе VCSEL [21]	ADF350 (основная мода)
Диапазон перестройки частоты, ГГц	2,5–15	2,5–9	2,2–4,4
Выходная мощность, дБм	9	7	5
Подавление побочных мод, дБ	46,5	50	13
Фазовый шум на частоте 3 ГГц при отстройке, дБн/Гц			
10 kHz	-125	-108	-92
100 kHz	-128	-118	-111
1 MHz	-138	-136	-134

Кроме того, основываясь на фундаментальных исследованиях оптических межсоединений в интегральных схемах [27, 28], в последние годы выполнен анализ эффективности применения исследованных ранее лазеров (VCSEL) и фотодиодов р-і-n-типа в интегральном исполнении и фотоннокристаллических пассивных узлов в перспективных гетерогенных ФИС [29]. Особенность их построения заключается в том, что на определенных участках кремниевой пластины с пассивными интегрально-оптическими элементами, как, например, волноводами, разветвителями, спектральными мультиплексорами и т.д., устанавливаются активные эпитаксиальные структуры (лазеры, фотодетекторы, модуляторы и т.д.), сформированные на подложках из других материалов, например, GaAs, InP, LiNbO₃, SiN, GaN. Для конкретности результатов моделирования выбрана схема оптического межсоединения с типичной для современной телекоммуникационной волоконно-оптической системы скоростью передачи 10 Гбит/с. Полученные результаты позволили определить оптимальные принципы построения данного узла гетерогенной ФИС и подтвердили эффективность описанного выше подхода на базе сквозного проектирования с использованием Т-CAD и OE-CAD.

Однако, как показали дальнейшие исследования, выше описанный подход становится некорректным при проектировании радиоэлектронных устройств и систем СВЧ-диапазона на базе радиофотонной технологии. Основная причина заключается в том, что существующие в мире оптические и оптоэлектронные САПР (табл. 2) развиты значительно слабее, чем САПР, предназначенные для моделирования компонентной базы, узлов и устройств СВЧ-диапазона. В библиотечных моделях этих САПР не учитываются особенности работы компонентов и узлов в СВЧ диапазоне, что приводит к значительным погрешностям расчета. Кроме того, с помощью современных OE-CAD очень сложно либо невозможно выполнить модельные эксперименты по расчету ключевых параметров и характеристик радиофотонных устройств и систем, включающих компоненты и узлы оптического и СВЧ-диапазонов. Речь идет о характеристиках фазовых шумов, коэффициентах шума, коэффициентах передачи в режиме большого сигнала, интермодуляционных искажениях, динамическом диапазоне. В связи с этим, еще в начале 90-х годов прошлого столетия сделан вывод, что для повышения точности моделирования радиофотонных устройств и систем с учетом влияния паразитных параметров цепей СВЧ-диапазона необходимо применение работающих на символьном уровне профессиональных СВЧ-САПР [30]. Типичными представителями таких программных сред являются САПР ADS фирмы Keysight Technologies и САПР AWDE фирмы National Instruments, в которых указанные

выше параметры и характеристики рассчитываются посредством «однокнопочной» операции.

Подобный подход для проектирования оптоэлектронной компонентной базы с полосой пропускания в радиочастотном диапазоне несколько ранее был предложен нами [31] и в прошлом году окончательно оформлен с учетом современного уровня развития радиофотоники [32]. Для его реализации с помощью САПР NI AWRDE разработана активная компонентная база радиофотоники (рис. 5): нелинейные модели в виде ФЭС лазерного излучателя (VCSEL) [33, 34], р-і-n-фотоиода [20, 35] и электрооптического модулятора [36], которые приведены на рис. 9. Используя ее, разработаны модели, проведены модельные эксперименты и экспериментальная верификация ключевых радиофотонных устройств: оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов [37] и оптоэлектронного смесителя сигналов СВЧ-диапазона [38].

Показанное в результате близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о корректности разработанных моделей.

Обучение

Учитывая высокий интерес к радиофотонике ведущих отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности, в Московском технологическом университете (МИРЭА) в рамках дополнительного обучения разработана Программа профессиональной переподготовки «Фотоника и радиофотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона», и в настоящее время проводится обучение сотрудников семи предприятий Москвы и Московской области. Программа направлена на получение компетенций, необходимых для приобретения новой квалификации: инженер – разработчик радиоэлектронных систем с применением радиофотоники.

Основной целью программы является получение следующих профессиональных компетенций для приобретения новой квалификации:

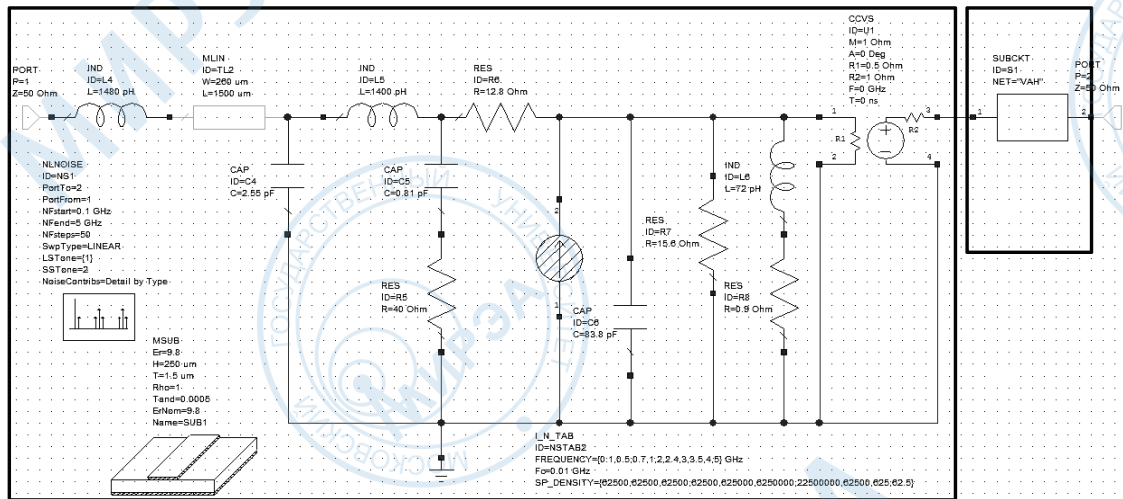
- ◆ представлений о современной фотонной компонентной базе (ФКБ) и принципах построения аналоговых волоконно-оптических систем передачи, являющихся базой для радиофотонных узлов в радиоэлектронной системе СВЧ-диапазона, и предъявляемым к ним требованиям;
- ◆ знаний теоретических и практических вопросов разработки, исследования и применения радиоэлектронных устройств и систем СВЧ-диапазона на базе радиофотонных технологий;
- ◆ умений компьютерного проектирования вышеуказанных устройств и систем и расчета их основных параметров и характеристик;
- ◆ навыков измерения основных характеристик ФКБ и узлов формирования, передачи и обработки сигналов, используемых в радиоэлектронных устройствах и системах СВЧ-диапазона на базе радиофотонных технологий.

Нормативная трудоемкость программы 250 часов, из них 116 часов аудиторных занятий и 134 часа самостоятельной работы слушателей. Срок освоения программы 29 недель, форма обучения очная, режим занятий 4 часа в неделю (аудиторные занятия). Сфера применения компетенций, полученных после освоения программы: разработка аппаратуры для систем радиолокации, радиотехнической разведки, радиоэлектронного противодействия, радионавигации и комбинированных волоконно-эфирных телекоммуникационных систем.

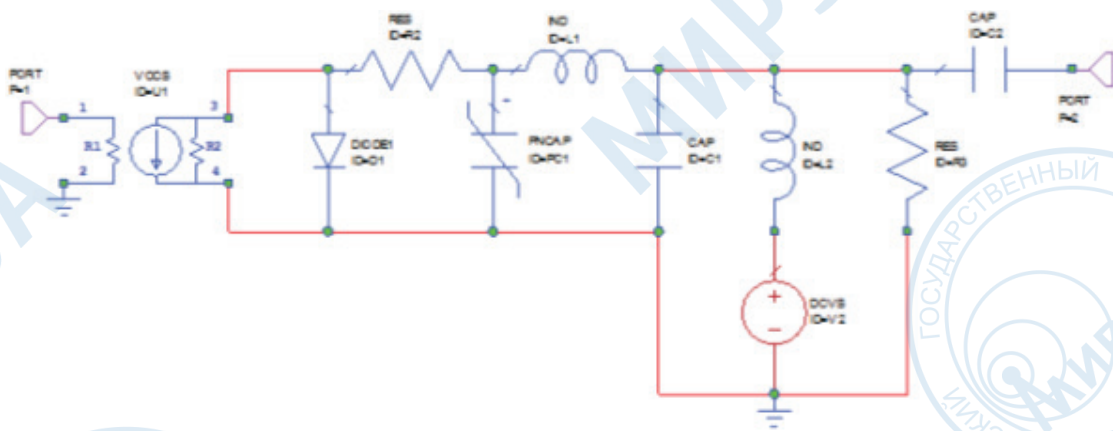
Учебный план программы содержит модуль 1 «Основы современной фотоники и радиофотоники» (общее количество часов 96, из них: лекции 36 часов, практические занятия 28 часов, самостоятельная работа слушателей 32 часа) и модуль 2 «Применение фотонной и радиофотонной технологий в перспективных радиоэлектронных системах СВЧ-диапазона» (общее количество часов 154, из них: лекции 20 часов, практические занятия 32 часа, самостоятельная работа слушателей 102 часа). Формой итогового контроля является подготовка и защита квалификационной работы, тема которой предлагается предприятием, направившим своих специалистов на обучение.

Научно-технологический центр «Интегральная радиофотоника»

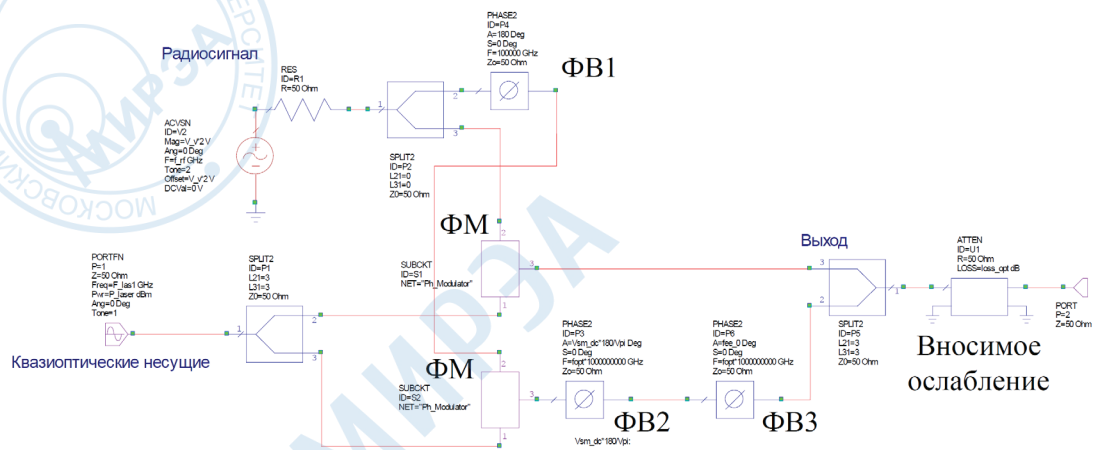
Следуя рассмотренным выше мировым тенденциям развития радиофотоники, в Москов-



а



б



в

Рис. 9. Модели лазерного излучателя (а), р-і-п-фотодетектора (б) и электрооптического модулятора (в) в САПР NI AWRDE.

ском технологическом университете (МИРЭА) организован Научно-технологический центр «Интегральная радиофотоника» (НТЦ ИРФ). Структура НТЦ ИРФ включает в себя два подразделения: новый дизайн-центр «Интегральная радиофотоника» (ДЦ ИРФ) и действующую в течение 8 лет Объединенную научно-исследовательскую лабораторию «Сверхвысокочастотные и оптоэлектронные устройства» (ОНИЛ СОУ).

Целью деятельности НТЦ ИРФ является:

- ◆ развитие в стране нового научно-технологического направления «радиофотоника», появившегося в последние годы на стыке фотоники и сверхвысокочастотной радиоэлектроники;
- ◆ создание и обеспечение эффективного функционирования первого в стране дизайн-центра по проектированию изделий интегральной радиофотоники.

Конкретной задачей ДЦ ИРФ является: компьютерное моделирование и топологическое проектирование радиофотонных интегральных схем (РФИС), заказ РФИС на европейских (а в дальнейшем, на отечественных) фабриках.

Конкретные задачи ОНИЛ СОУ в рамках деятельности НТЦ ИРФ состоят:

- в разработке ТЗ на основе технических требований Заказчика под требования фотонных фабрик;
- в конструировании, изготовлении и экспериментальном исследовании макетных образцов для верификации технических показателей ТЗ и результатов проектирования, входной контроль и приборная характеристика изготовленных образцов РФИС.

Начало регулярного выполнения заказов запланировано на осень 2016 года. До этого дизайн-центр будет работать в тестовом режиме.

Заключение

Применение радиофотоники в радиосредствах различного назначения имеет потенциал, прежде всего, с точки зрения повышения рабочих частот вплоть до терагерцевого диапазона, что обеспечивает возможность увеличения их быстродействия и пропускной способности в соответствии с современными требованиями. Другое направление радиофотоники состоит в улучшении тактико-технических показателей существующих радиосредств, таких как полоса пропускания, электромагнитная совместимость, имитостойкость, массогабаритные характеристики.

Данные технологии могут быть применены практически во всех видах радиоэлектронной аппаратуры военного и гражданского назначений: радиолокации, радиоэлектронного противодействия, навигации, связи. Их скорейшее внедрение позволит не только решить ближайшие задачи отечественной радиоэлектронной промышленности и промышленности средств связи в области импортозамещения, но и существенно повысить обороноспособность, а также конкурентоспособность и экспортный потенциал российской техники в краткосрочной и долгосрочной перспективе за счет опережающих поставок радиоаппаратуры, еще не освоенной зарубежной промышленностью.

Следуя описанным выше мировым и отечественным тенденциям в области развития радиофотонных технологий, в МИРЭА выполнен цикл работ по моделированию и экспериментальной верификации основной компонентной базы и ключевых узлов и устройств радиофотоники. Организовано профессиональное обучение сотрудников ведущих отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности и создан дизайн-центр «Интегральная радиофотоника».

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант офи-м № 14-29-08141).

Литература:

1. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature Photonics. 2007. V. 1. P. 319–330.
2. Yao J. Microwave Photonics // IEEE J. Lightwave Technol. 2009. V. 27. № 3. P. 314–335.
3. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901–914.
4. Hartog A.H., Conduit A.J., Payne D.N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibers // Optical and Quantum Electronics. 1979. V. 11. № 3. P. 265–273.
5. Inao S., Sato T., Senstui S., Kuroha T., and Nishimura Y. Multicore optical fiber // In: Opti-

- cal Fiber Communication Conference (OFC'79). Washington, D.C., United States, 6 March 1979. P. 46–48. Paper WB1.
6. Белкин М.Е., Яковлев В.П. Наноструктурный поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором О и С спектральных диапазонов в качестве ключевого элемента компонентной базы радиофотоники // *Наноматериалы и наноструктуры*. 2014. Т. 5. № 3. С. 37–49.
 7. Deri R.J., Kapon E. Low-loss III-V semiconductor optical waveguides // *IEEE J. Quantum Electronics*. 1991. V. 27. № 3. P. 626–640.
 8. Koch T.L., Koren U. Semiconductor photonic integrated circuits // *IEEE J. Quantum Electronics*. 1991. V. 27. № 3. P. 641–653.
 9. Liang D., Bowers J.E. Photonic integration: Si or InP substrates // *Electronics Lett*. 2009. V. 45. № 12. P. 578–581.
 10. Marpaung D., Roeloffzen C., Heideman R., Leinse A., Sales S., Capmany J. Integrated microwave photonics // *Laser & Photonics Reviews*. 2013. V. 7. № 4. P. 506–538.
 11. Uruk V.J., McKinney J.D., Williams K.J. *Fundamentals of Microwave Photonics*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 467 p.
 12. Photonics Integration Conference. High Tech Campus Eindhoven, the Netherlands. 23 Sept. 2015.
 13. НИР «Исследование функциональных элементов оптоэлектронных и оптических интегральных схем на основе фотонных кристаллов для перспективных телекоммуникационных систем» // Аналитическая целевая программа Минобрнауки «Развитие научного потенциала высшей школы», 2009-2011 г.г. рег. № 2.1.2/494
 14. Белкин М.Е., Костенко К.Н., Мишина Е.Д. Современные методы и средства автоматизированного проектирования канальных и фотоннокристаллических волноводных структур для пассивных элементов ОИС и ОЭИС // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы международной НТК «INTERMATIC-2009»*. Декабрь 2009 г., Москва. М.: Энергоатомиздат. 2009. Ч. 2. С. 202–212.
 15. Belkin M.E. TCAD and ECAD Modeling of Microwave and Millimeter Wave Photonic Devices // *Int. Symposium PIERS-2009*. August 2009. Moscow. Abstracts. P. 322.
 16. Белкин М.Е., Васильев М.Г. Полупроводниковые лазерные излучатели с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции // *Нано- и микросистемная техника*. 2008. № 9 (98). С. 23–33.
 17. Belkin M.E., Vasil'ev M.G. Simulation and design of semiconductor lasers with high power-bandwidth product for modern telecom and radar systems. // *Int. Conf. Laser Optics 2008*. St. Petersburg, Russia, June 2008. P. 66.
 18. Белкин М.Е., Белкин Л.М. Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ-диапазона // *Нано- и микросистемная техника*. 2009. № 11. С. 32–37.
 19. Belkin M.E., Dzichkovski N.A. Research of Microwave-Bandwidth p-i-n Photodetectors // *Proceedings Eurocon-2009*. St. Petersburg, Russia, May 2009. P. 193–196.
 20. Belkin M.E. Multiscale Computer Aided Design of Microwave-Band P-I-N Photodetectors. P. 231–250. // *In book Photodetectors / Ed. by S. Gateva*. Croatia: InTech, 2012. 460 p.
 21. Belkin M.E., Belkin L., Loparev A., Sigov A.S., et al. VCSEL-based Processing of Microwave Signals // *Int. Topical Meeting on Microwave Photonics. The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, MWP/APMP2014*. Sapporo, Japan. Oct. 2014. P. 481–484.
 22. Belkin M.E., Belkin L., Loparev A., Sigov A.S., Iakovlev V. Long Wavelength VCSELs and VCSEL-Based Processing of Microwave Signals // *In book Optoelectronics – Advanced Materials and Devices. / Ed. by S. Pyshkin and J. Ballato*. Croatia: InTech, 2015. Chapter 6. P. 231–250.
 23. НИР «Фотоника». Принципы построения и анализа новых приборов и устройств фотоники для перспективных телекоммуникационных систем. 2009-2011 г.г. Рег. № 2.2.2.2/6876.
 24. НИР «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям «Индустрия наносистем и наноматериалов» и «Информационно-телекоммуника-

ционные системы» в центре коллективного пользования научным оборудованием «Учебно-научное объединение «Электроника». 2009-2010 г.г.

25. Belkin M.E., Loparev A., Semenova Y., Farrell G., Sigov A.S. A Tunable RF-Band Optoelectronic Oscillator and OE-CAD Model for its Simulation // Microwave and Optical Technology Letters. 2011. V. 53. № 11. P. 2474–2477.

26. Belkin M.E., Loparev A.V. A Microwave Optoelectronic Oscillator: Mach-Zehnder Modulator or VCSEL Based Layout Comparison // PIERS Proceedings. Moscow, Russia, August 19–23 2012. P. 1138–1142.

27. Белкин М.Е., Сигов А.С. Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия. 2012. № 1(31). С. 8–14.

28. Белкин М.Е., Сигов А.С. Исследование проблем создания оптических межсоединений // Наноиндустрия. 2012. № 2(32). С. 18–28.

29. Белкин М.Е., Бахвалова Т.Н., Хмельницкий И.В. Исследование компонентной базы и узлов гетерогенной фотонной интегральной схемы для оптического межсоединения // Нано-материалы и наноструктуры. 2014. Т. 5. № 4. С. 29–42.

30. van Dam C., de Vreede L.C.N., Smit M.K., Tauritz J.L., Verbeek B.H. Optical chip design with a microwave CAD-system // in Proc. 10th Eur. Conf. Circuit Theory and Design. Sept. 2–6, 1991. New York: Polytechnic, 1991. V. III. P. 1316–1323.

31. Белкин М.Е., Эйнасто М.В. Измерение частотных характеристик фотодиодов с использованием физической эквивалентной схемы // Радиотехника. 1989. № 11. С. 88–91.

32. Научно-технический отчет по гранту РФФИ офи_м № 14-29-08141, этап 2, 2015. 32 с.

33. Belkin M.E., Belkin L., Sigov A.S. [et al.] Performances of Microwave-Band Analog Signal Transmission using Wafer-Fused Long Wavelength VCSELs // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. V. 23. № 20. P. 1463–1465.

34. Belkin M.E., Iakovlev V. Microwave-band Circuit-level Semiconductor Laser Modeling // 9th European Modelling Symposium on Mathematical Modelling and Computer Simulation, EMS2015, Madrid, Spain, 6–8 October 2015. P. 443–445.

35. Belkin M.E., Sigov A.S. Circuit-Level Large-Signal Modeling of Microwave Bandwidth Photodetector // Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications. ICEAA 2015, Torino, Italy, 7-11 Sept. 2015. P. 1587–1589.

36. Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Применение модели электрооптического модулятора Маха-Цандера в оптической диаграммообразующей схеме антенной решетки // 25-я Междунар. НТК СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, КрыМиКо-2015, г. Севастополь, 6–12 сентября 2015. С. 1031–1032.

37. Belkin M. E., Golovin V. Microwave Electronic CAD Modeling of Microwave-Band Optoelectronic Oscillator Based on Long Wavelength VCSEL // Int. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. COMCAS 2015. Tel Aviv, Israel, 2–4 November 2015. P. 1–3.

38. Belkin M.E., Tyschuk Y. Microwave Electronic CAD Modeling of Microwave Photonic Devices Based on LW-VCSEL Mixing // II Int. Conf. on Microwave and Photonics. ICMAP-2015. Dhanbad, India, December 11–13, 2015. P. 1–2.

УДК: 339.944

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО МЕЖДУ КНР И РФ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Чэнь Циюэ, д.ист.н., доцент

*Академия общественных наук провинции Хэйлуцзян, Харбин, КНР
Автор для переписки, e-mail: chenqiuje719@163.com*

Статья посвящена проблеме развития китайско-российского научно-технического сотрудничества с позиций стратегического партнерства. Показано, что в настоящее время китайско-российские научно-технические контакты становятся более тесными, сферы и масштаб взаимодействия расширяются и уровень его углубляется. В то же время в научно-техническом сотрудничестве двух стран существует ряд проблем, как-то: относительно низкая активность, отсутствие научных кадров, недостаток капиталовложений. В заключении автор предлагает собственные рекомендации по устранению указанных проблем.

Ключевые слова: научно-техническое сотрудничество, КНР, РФ, состояния, проблемы, предложения.

CHINA-RUSSIAN SCIENCE AND TECHNOLOGY COOPERATION: SITUATION, PROBLEM AND SUGGEST

Chen Qiuje

*Academy of Social Sciences of province Heilongjiang, Harbin, China
Corresponding author e-mail: chenqiuje719@163.com*

This paper deals with the Chinese-Russian scientific and technological cooperation problem from the strategic partnership point of view. It has been shown that nowadays Chinese-Russian scientific and technological contacts are becoming closer, the fields and scope of their activities are broadening and deepening. At the same time, there are several problems in scientific and technological col-laboration of both countries such as: rather low activity, scientific brainpower lack, investment shortage. The author has concluded with his own recommendations upon the illumination of the problems mentioned.

Keywords: scientific and technological cooperation, China, Russia, state, problems, suggestions.

На фоне глобализации многостороннее научно-техническое сотрудничество является эффективным путем внедрения инноваций и повышения конкурентоспособности науки и техники.

18 декабря 1992 года между Китайской народной республикой (КНР) и Российской Федерацией (РФ) было подписано межправительственное соглашение о научно-техническом сотрудничестве. С тех пор прошло более 20 лет. Можно с уверенностью констатировать, что за эти годы китайско-российское научно-техническое сотрудничество стабильно развивается. Субъектами сотрудничества выступают не только правительства, но и исследовательские учреждения. Так, Китайская академия наук и Российская академия наук подписали ряд соглашений, в рамках которых осуществляются высокоуровневые и высокоэффективные проекты.

Свыше 30 институтов РАН сотрудничают с различными исследовательскими центрами Китая:

- создан объединенный китайско-российский Центр по космической погоде;
- открыт китайско-российский исследовательский Центр по изучению природных ресурсов, экологии и охране окружающей среды;
- построен Китайско-российский Центр научно-технического сотрудничества и промышленного внедрения провинции Хэйлунцзян;
- новый Центр создает и Шэньянский промышленный институт совместно с Томским политехническим университетом и Сибирским отделением Академии наук России: учреждение будет заниматься космическими и авиационными технологиями, биоинженерией и энергетикой [1];
- в июне 2015 г. в Новосибирске открылся российско-китайский Центр развития ядерной физики, созданный на базе Института ядерной физики РАН. Здесь российские и китайские специалисты смогут заниматься новыми разработками в сфере ядерной физики [2].

6 ноября 2007 года, в рамках состоявшейся в Москве 12-ой регулярной встречи глав правительств КНР и РФ, стороны подписали «Меморандум о сотрудничестве в области реализации совместных проектов по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники между Министерством науки и техники Китайской Народной Республики и Федеральным Агентством по науке и инновациям Российской Федерации». Стороны приняли решение о развитии сотрудничества на основе принципов взаимовыгоды и объединения обоюдных преимуществ в таких областях, как нанотехнологии и новые материалы, науки о жизни, энергетика и энергосбережение, рациональное использование природных ресурсов, информационно-коммуникационные технологии. 12 апреля 2012 года Российский Фонд «Сколково» и Центр развития индустрии высоких технологий «Факел» при Министерстве науки и техники КНР подписали «Меморандум о взаимопонимании, направленный на сотрудничество в области совместных научных изысканий, разработки и коммерциализации инновационных технологий». Двустороннее взаимодействие осуществляется в приоритетных областях, в том числе, путем создания технопарков и инкубаторов, трансформации технологий и привлечения инновационных капиталов [3].

Следует отметить, что неуклонно углубляется взаимное доверие между нашими странами в области политики. Особенно ясно об этом говорит установление отношений стратегического партнерства, заложившее прочную основу для развития китайско-российского научно-технического сотрудничества. После подписания «Меморандума о взаимопонимании между Министерством промышленности, науки и технологий РФ и Министерством науки и техники КНР по сотрудничеству в области инновационной деятельности» (ноябрь 2000 г.), созданы российско-китайские Центры наукоемких технологий, специальные Центры сотрудничества в области технологической конверсии военного производства, имеющие важное государственное значение. Кроме того, на региональном уровне в некоторых провинциях, например, в провинциях Шандунь, Гуандунь, Хэйлунцзян, образованы технологические союзы взаимодействия с Россией в составе местного правительства, вузов, научно-исследовательских институтов, финансовых учреждений и предприятий. В связи с этим механизм сотрудничества в области науки и техники между КНР и РФ оптимизируется и на высшем, и на региональном уровне [4].

Несмотря на достигнутые значительные успехи, китайско-российское научно-техническое сотрудничество отстает от двухсторонних политических отношений.

Существуют следующие проблемы, тормозящие дальнейшее развитие научно-технического сотрудничества между нашими странами.

1. Относительно низкая активность и потенциал двустороннего сотрудничества [5]. После распада СССР российская экономика долго находилась в кризисном положении, поэтому многие специалисты легко сделали вывод, что российский научно-технический потенциал сильно падает, увеличивается отсталость от западных стран (США, Германия, Япония). Эти страны стали важными и приоритетными партнерами КНР в области науки и техники. Что касается сотрудничества с РФ, то каждый из партнеров преследует свои интересы: китайской

стороне хочется получить российские энергоресурсы, а российская – нуждается в китайских капиталовложениях.

2. Отсутствие научных кадров – одна из ключевых проблем. Специалисты, подготовленные в 1950–1960 гг. еще в СССР, которые свободно владеют русским языком, уже достигли 70-летнего и более возраста. Количество выпускников китайских вузов по специальности «Русский язык» с каждым годом уменьшается. Студенты предпочитают занятия английским, японским, испанским, немецким языками, потому что тогда им легче найти работу. Отсюда возникает необходимость в подготовке кадров, которые свободно говорят, читают специальную литературу и пишут по-русски.

3. Недостаток капиталовложений в научно-техническое сотрудничество. В настоящее время доля специальных расходов на международное сотрудничество в области естественных наук из государственного Фонда составляет только 4%. Кроме Министерства науки и техники КНР, финансовую поддержку международных научно-технических проектов осуществляют также Министерство образования, Управление иностранных специалистов, Министерство промышленности и связи, научно-технические общества, но эти вложения составляют не бóльшую долю от общих средств. Нельзя не обратить внимание на то, что предприятия и частные лица не оказывают финансовую поддержку совместным проектам КНР и РФ. Как правило, в сотрудничестве между обеими странами принимает участие акционерный капитал в виде технических и человеческих ресурсов. На деле, с одной стороны, российским предприятиям и/или частным лицам не хочется брать ответственность за финансовые риски, с другой стороны, в Китае фактически отсутствует фонд капиталовложений для специального китайско-российского научно-технического сотрудничества, а частные капиталы принимают в нем участие крайне редко [6].

Представляется, что сегодня, когда политические отношения между КНР и РФ вступили в самый лучший в истории период, необходимо поднять уровень и масштаб двухстороннего научно-технического сотрудничества. Вот наши предложения.

◆ Следует по достоинству оценить российский научно-технический потенциал в целом. Сохраняя и укрепляя научно-техническое сотрудничество с США, Евросоюзом, Японией, важно особое значение придавать России. Мы должны определить место китайско-российского научно-технического сотрудничества в системе многосторонних отношений и наметить краткосрочную и долгосрочную программы его развития. Уровень научно-технического сотрудничества между двумя странами должен быть поднят на качественно новую ступень.

◆ В кратчайшие сроки должны быть подготовлены научные кадры нескольких типов: специалисты, владеющие не только русским языком, но и специальными знаниями в области техники, науки, международной торговли, маркетинга, нормативно-правовой базой РФ; кадры, непосредственно принимающие участие в реализации совместных проектов (фактически они являются ядром китайско-российского научно-технического сотрудничества); персонал, выполняющий управленческую и обслуживающую функции. Реализация данного пункта за счет взаимного обмена, стажировок китайских специалистов в российских вузах, научно-исследовательских и академических институтах, даже на предприятиях, приглашения российских инженеров, менеджеров и исследователей в Китай будет способствовать ускорению процесса подготовки кадров.

◆ Необходимо увеличение капиталовложений и постоянная поддержка научно-технического сотрудничества с Россией: это и вовлечение все новых источников средств для развития научно-технических контактов с РФ, и создание различных каналов для поступления средств из государственного и местного бюджета, от предприятий и частных лиц. Несомненно, основной вклад должны вносить бюджетные капиталовложения. Целесообразно рекомендовать Министерству науки и техники и Комитету Фонда естественных наук КНР усилить поддержку международных проектов, преимущественно китайско-российских. Следует поощрять вузы, научные учреждения, предприятия, иностранные и народные научные фонды, даже частных

инвесторов, вкладывающие ассигнования в китайско-российское научно-техническое сотрудничество. Можно создать специальный фонд китайско-российского научно-технического сотрудничества, чтобы обеспечить качественное и успешное выполнение проектов.

Таким образом, в XXI столетии – веке высоких технологий – научно-техническое сотрудничество России и Китая должно войти в новую фазу развития. Потенциалы обеих стран в этой сфере достаточно велики, и они должны быть реализованы с максимальной отдачей.

Литература:

1. Чэн Гуаньсинь. Предложения для содействия китайско-российскому научно-техническому сотрудничеству в новый период // Научно-техническая информатика. 2010. № 23. С. 55.
2. В Сибири откроют российско-китайский центр ядерной физики. <http://runews24.ru/society/science/09062015-centr-yadernoj-fiziki.html>
3. Россия и Китай договорились о сотрудничестве в сфере науки и инноваций. <http://sk.ru/news/b/pressreleases/archive/2012/04/12/rossiya-i-kitay-dogovorilis-o-sotrudnichestve-v-sfere-nauki-i-innovaciy.aspx>
4. Ши Чуньян. Исследование и предложения для укрепления китайско-российского научно-технического сотрудничества в новый путинский период // Внешняя экономика и торговля. 2013. № 10. С. 44–45.
5. Вань Цзин. Краткий анализ о взаимообусловленных факторах китайско-российского научно-технического сотрудничества // Этнографический вестник Хэйлунцзян. 2001. № 2. С. 115.
6. Гао Цзисян. Региональное социально-экономическое развитие – попытка и практика России. Пекин, 2013. С. 286–287.

УДК: 538.958

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПО РАЗМЕРАМ ГРАНУЛ В НАНОКОМПОЗИТАХ

А.Н. Юрасов, к. ф.-м. н., доцент

*Кафедра нанoeлектроники Физико-технологического института МИРЭА
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru*

Работа посвящена теоретическому исследованию распределения по размерам гранул в нанокompозитах. Показана важность учета распределения, его связь с размерным эффектом, влияющим на теоретическое описание оптических и магнитооптических спектров нанокompозитов, особенно в ближней ИК-области.

Ключевые слова: размерный эффект, нанокompозиты, оптические и магнитооптические спектры, распределение.

ABOUT DISTRIBUTION ON THE GRANULE SIZE IN NANOCOMPOSITES

A.N. Yurasov

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: alexey_yurasov@mail.ru*

In this work we have presented the theoretical study of the size grain distribution in nanocomposites. The importance of the consideration of distribution, its relation with the size effect, influencing the theoretical description of nanocomposite optical and magneto-optical spectra, mainly in the near-IR region have been demonstrated. It has been also shown that the size effect can change the amplitude, form and sign of the optical and magneto-optical spectra. We have developed the formulas for the size effect as well as considered the distribution applications for the correct description of the optical and magneto-optical properties with regard to the grain size effect.

Keywords: size effect, nanocomposites, optical and magneto-optical spectra, distribution.

Нанокompозиты – это неоднородные магнетики, в которых ферромагнитные частицы помещены в пара- или диамагнитную матрицу диэлектрика. Для описания свойств ферромагнитных нанокompозитов используются методы эффективной среды [1]. Применительно к нанокompозитам необходимо учитывать, что рассеяние на поверхности гранул, приводящее к квазиклассическому размерному эффекту (РЭ), модифицирует как диагональные $\epsilon_{xx} = \epsilon = \epsilon_1 - i\epsilon_2$, так и недиагональные $\epsilon_{xy} = \gamma$ компоненты тензора диэлектрической проницаемости гранул, если их средний размер (радиус r_0) сравним с длиной свободного пробега электрона l . Размерный эффект оказывает значительное влияние на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов – особенно в ближней ИК-области спектра, изменяя амплитуду, форму и знак спектров.

Настоящая работа посвящена обсуждению влияния распределения по размерам гранул на оптические и магнитооптические свойства нанокompозитов.

Проведем учет распределения по размерам гранул следующим образом.

О распределении по размерам гранул в нанокompозитах

Время свободного пробега электронов в грануле (τ_{part}) меньше соответствующего ему времени в массивном образце (τ_{bulk}) за счет соударений с поверхностью гранул [1]:

$$\frac{1}{\tau_{part}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{v_f}{r_0} \quad (1)$$

где v_f – скорость Ферми.

Тогда, принимая во внимание, что частотная зависимость внутризонной проводимости описывается законом Друде-Лоренца, можно аналогично работе [1] записать

$$\gamma_{mod} = \gamma + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{bulk}(0)/\tau_{bulk}^2}{\omega(\omega+i/\tau_{bulk})^2} - \frac{4\pi\sigma_{xy}^{gr}(0)/\tau_{part}^2}{\omega(\omega+i/\tau_{part})^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{xy}^{bulk}(0) = 4 M_s R_{s,bulk} / \rho_{bulk}^2$, $\sigma_{xy}^{gr} = 4 M_s R_{s,gr} / \rho_{gr}^2$; M_s – намагниченность насыщения; R_{gr} – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ), τ_{bulk} – время свободного пробега в массивном образце, τ_{gr} – время свободного пробега в грануле, ρ_{bulk} – удельное сопротивление массивного образца, ρ_{gr} – удельное сопротивление гранулы [2].

Размерный эффект оказывает влияние и на коэффициент аномального эффекта Холла, и на удельное сопротивление. Последнее дается выражением $\rho_{gr} = \rho_{bulk}(1+l/r_0)$, и влияние РЭ на коэффициент АЭХ гранул можно записать в виде:

$$R_{gr} = R_{bulk} + 0.2R_s \frac{l}{r_0} \left(1 + \frac{l}{r_0}\right), \quad (3)$$

где R_s – значение коэффициента АЭХ материала поверхности гранул [2].

В вышеприведенных формулах (1)–(3) возможное распределение гранул по размерам не учитывается. В то же время оно важно для описания оптических и магнитооптических спектров нанокompозитов, так как диагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости отвечают за оптические свойства, а недиагональные – за магнитооптические свойства. Особенно ярко это проявляется в ближней ИК-области спектра, что связано с внутризонными переходами [2, 3].

Рассмотрим вариант, когда вероятности того, что гранулы имеют разные размеры, примерно одинаковы. Тогда можно принять равномерное распределение гранул по размерам. Воспользуемся сведениями из теории вероятностей. Случайная величина имеет непрерывное равномерное распределение на отрезке $[a, b]$, где, если её плотность вероятности (распределения) $f_X(x)$ имеет вид [4]:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a, b] \\ 0, & x \notin [a, b] \end{cases}. \quad (4)$$

Интегрируя плотность вероятности, получаем следующую функцию распределения [4]:

$$F_X(x) \equiv \mathbb{P}(X \leq x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}. \quad (5)$$

Применительно к нашему варианту, a – это наименьший возможный размер гранулы, b – наибольший размер. Теперь обозначим наименьший размер r_0 , наибольший – r_1 , а текущий – r , тогда функцию возможного размера гранулы $R(r)$ можно записать в виде:

$$R(r) = r_0(1 + F(r)) \quad (6)$$

Если размер гранул меняется в два раза по сравнению с исходным r_0 , функция принимает вид:

$$R(r) = r_0 \left(1 + \frac{r-r_0}{r_1-r_0} \right) \quad (7)$$

В случае равномерного распределения в качестве эффективного значения размера гранулы можно взять среднее арифметическое между наименьшим размером – r_0 и наибольшим – r_1 . Важно отметить, что рассмотрение равномерного распределения, безусловно, важный, но не самый общий случай. Следовательно, при рассмотрении нанокompозитов различных составов важно правильно найти величину $F(r)$ и заменить ею величину r_0 в формулах (1)–(3).

Учет распределения по размерам гранул позволяет более точно описать спектры экваториального эффекта Керра на p -компоненте, рассчитанные с использованием уравнения (2) по формуле:

$$\delta_p = (A\gamma_1 + B\gamma_2) \frac{2 \sin 2\varphi}{A^2 + B^2} \quad (8)$$

где $A = \varepsilon_2(2\varepsilon_1 \cos^2 \varphi - 1)$, $B = \cos^2 \varphi(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$, φ – угол падения света [5].

Это позволяет, например, для нанокompозитов Co–Al–O или $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ объяснить величину экваториального эффекта Керра, спектры которого в ближней ИК-области меняют знак и величину – от 1% до -1%, а также значительно изменяют свою форму [6–8]. Такое поведение можно объяснить только распределением по размерам гранул и наличием размерного эффекта.

Таким образом, полученные результаты, связанные с учетом размерного эффекта и распределения по размерам гранул, позволяют улучшить описание и объяснить экспериментальные оптические и магнитооптические спектры в нанокompозитах преимущественно в ближней ИК-области.

Литература:

1. Niklasson G.A., Granqvist C.G. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. P. 3382–3410.
2. Грановский А.Б., Кузьмичев М.В., Юрасов А.Н. // Вестник МГУ. Серия Физика. Астрономия. 2000. № 6. С. 67–69.
3. Granovsky A.B., Gan'shina E.A., Vinogradov A.N., Rodin I.K., Yurasov A.N. and Khan H.R. // Physics of Metals and Metallography. 2001. V. 91. P. 52–56.
4. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей: 8-е изд., испр. и доп. М.: Едиториал УРСС, 2005. 448 с.
5. Xui P. M., Stroud D. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 50. P. 950–952.
6. Ganshina E., Granovsky A., Gushin V., Kuzmichov M., Podrugina P., Kravetz A., Shipil E. // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 1997. V. 241. № 1-2. P. 45–51.
7. Буравцова В.Е., Ганьшина Е.А., Дмитриев А.А., Иванова О.С., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. // Изв. АН. Серия физическая. 2009. Т. 73. № 9. С. 1374–1376.
8. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. // Solid State Phenomena. 2011. V. 168-169. P. 533–536.

УДК: 621.396.96+621.391.821

МЕЖКАНАЛЬНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ПОЛЕЗНЫХ СИГНАЛОВ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ КАНАЛОВ

В.Г. Бартенов¹, д.т.н., профессор

Г.В. Бартенов²

В.К. Битюков¹, д.т.н., профессор

В.Е. Кутепов²

¹Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия

²АО ВНИИРТ, Москва, Россия

Автор для переписки, e-mail: bitukov@mirea.ru

Выполнен сравнительный анализ эффективности различных способов объединения каналов. Показано, что для независимых каналов схема отбора по минимуму уступает по эффективности схеме отбора по максимуму. Учет межканальной корреляции полезных сигналов делает отбор по максимуму и по минимуму близкими по эффективности.

Ключевые слова: многоканальные обнаружители, объединение каналов с максимальным и минимальным отбором, характеристики обнаружения, межканальная корреляция.

THE INFLUENCE OF INTERCHANNEL CORRELATION OF THE DESIRED SIGNALS, BEING COMBINED, ON MULTICHANNEL DETECTORS PERFORMANCE, USING METHODS OF SELECTION BY MAXIMUM AND MINIMUM

V.G. Bartenev¹,

G.V. Bartenev²,

V.K. Bitukov¹,

V.E. Kutepov²

¹Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia

²JSC VNIIRT, Moscow, Russia

Corresponding author e-mail: bitukov@mirea.ru

The comparative efficiency analysis of two ways of multiplexing based on minimum and maximum selection methods has been carried out. It has been shown that minimum selection method is less effective than the maximum one for independent channels. Minimum selection method approaches efficiency of the maximum selection one when considering interchannel desired signal correlation. However this consideration implies the efficiency decrease of maximum selection method, while improving the efficiency of minimum selection one.

Keywords: multichannel detectors, multiplexing based on maximum and minimum selection methods, detection performances, interchannel correlation.

Введение

Во многих радиотехнических системах применяется многоканальная обработка сигналов [1–7]. В частности, при построении обнаружителей движущихся целей для повышения их эффективности используются многоканальные доплеровские фильтры [8], а также многоканальные режекторные фильтры [9]. При этом если в многоканальных доплеровских фильтрах сигнал от цели может появиться в одном из доплеровских каналов, то в многоканальных режекторных фильтрах цель попадает во все каналы, так как зона прозрачности по скорости у них во многом совпадает. Именно для многоканальных режекторных фильтров, наряду со способом объединения по максимуму, в [10] предложено осуществлять объединение каналов с отбором по минимуму. Однако количественного системного анализа до сих пор сделано не было. Представляет практический интерес сравнительный анализ эффективности названных способов объединения каналов применительно к многоканальной обработке сигналов в радиотехнических системах.

Без уменьшения общности подхода к решению задачи сравнения эффективности различных способов объединения каналов, тип и эффективность многоканальных режекторных фильтров в каждом канале в данном исследовании не рассматривали. Их наличие учитывали через влияние межканальной корреляции полезных сигналов при их объединении на характеристики обнаружения.

Кроме того, высказаны предположения, что на входе схем отбора по минимуму или по максимуму в каждом канале действовала аддитивная смесь флуктуирующего сигнала и шума, а детекторы осуществляли выделение квадратов огибающих. При этом в каждой квадратуре на входе квадратичных детекторов действовал гауссов шум с нулевым средним значением и единичной дисперсией; шум в каналах был независимым; полезные сигналы во всех каналах имели одинаковую случайную флуктуирующую амплитуду, были независимы и коррелированы.

Вероятность ложной тревоги для схемы с отбором по максимуму и по минимуму для независимых каналов

Воспользовавшись теоремами сложения и умножения вероятностей применительно к объединению каналов, интегральные законы распределения наибольшей и наименьшей величин при одинаковом распределении N независимых случайных величин можно представить следующими формулами:

$$F_{\max}(x) = \prod_N F(x) \quad (1)$$

и

$$F_{\min}(x) = 1 - \prod_N [1 - F(x)] \quad (2)$$

где $F(x) = \int_{-\infty}^x w(y) dy$ интегральный закон распределения случайной величины.

Пусть случайные величины в рассматриваемом случае в каждом канале распределены по экспоненциальному закону с единичной дисперсией, тогда интегральный закон имеет вид

$$F(x) = 1 - \exp(-x/2) \quad (3)$$

Подставив (3) в выражения (1) и (2), получают интегральные законы распределения наибольшей и наименьшей величин для N случайных величин:

$$F_{\max}(x) = [1 - \exp(-x/2)]^N \quad (4)$$

и

$$F_{\min}(x) = 1 - [\exp(-x/2)]^N \quad (5)$$

При подстановке вместо переменной x в (4) порог L_{max} , а в (5) порог L_{min} получают вероятности неперевышения этих порогов в схемах с отбором по максимуму и по минимуму, соответственно:

$$F_{max} = [1 - \exp(-L_{max} / 2)]^N, \quad (6)$$

и

$$F_{min} = 1 - [\exp(-L_{min} / 2)]^N, \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) можно получить вероятности превышения порога L_{max} и порога L_{min} , то есть вероятности ложной тревоги:

$$FLT_{max} = 1 - (1 - e^{-L_{max} / 2})^N, \quad (8)$$

$$FLT_{min} = e^{-L_{min} N / 2}. \quad (9)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные пороги L_{max} и L_{min} для вероятностей ложных тревог 10^{-1} и 10^{-5} в случае двухканальной ($N = 2$) и восьмиканальной ($N = 8$) схем.

Таблица 1. Результаты расчета вероятности ложной тревоги

FLT / N	N = 2 L_{max} / L_{min}	N = 8 L_{max} / L_{min}
10^{-1}	5.93 / 2.30	8.67 / 0.57
10^{-5}	24.41 / 11.51	27.18 / 2.87

Вероятность правильного обнаружения флуктуирующего сигнала для схемы с отбором по максимуму и по минимуму

При наличии в аддитивной смеси не только шума, но и флуктуирующего сигнала с отношением сигнал/шум, равным q , интегральный закон распределения в отличие от (3) будет иметь вид

$$F(x) = 1 - \exp(-x / 2(1 + q^2)). \quad (10)$$

Выполнив преобразования аналогичные тем, что были использованы для получения вероятностей ложной тревоги, получают вероятности правильного обнаружения полезного сигнала

$$D_{max} = 1 - (1 - e^{-L_{max} / 2(1 + q^2)})^N, \quad (11)$$

и

$$D_{min} = e^{-(L_{min} / 2(1 + q^2)) N}, \quad (12)$$

Для верификации полученных формул (11) и (12) проведено моделирование двух- и восьмиканальных систем с отбором по максимуму и минимуму для вероятности ложной тревоги 10^{-1} и 10^{-5} . Результаты моделирования и аналитических расчетов представлены в виде характеристик обнаружения на рис. 1 и рис. 3 ($F=10^{-1}$ $N=2$ и 8) и на рис. 2 и рис. 4 ($F=10^{-5}$ $N=2$ и 8).

Основной вывод из представленной на рис. 1–4 информации состоит в том, что для независимых каналов большей эффективностью обладает схема объединения каналов с отбором по максимуму, причем эта эффективность возрастает и с ростом числа каналов, и с уменьшением вероятности ложной тревоги.

Важно также подчеркнуть отличное совпадение результатов аналитических расчетов с результатами моделирования обеих схем объединения каналов, что подтверждает достоверность полученных данных.

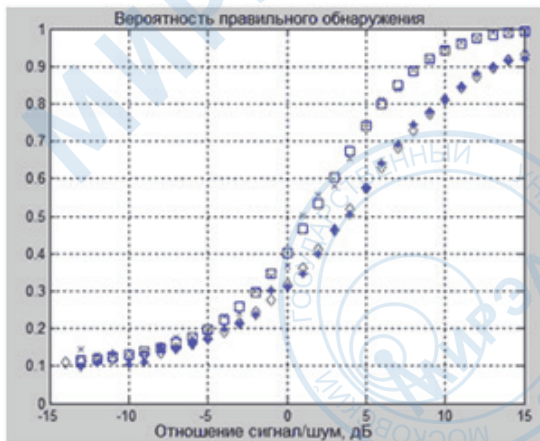


Рис. 1. Характеристики обнаружения двухканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-1}$

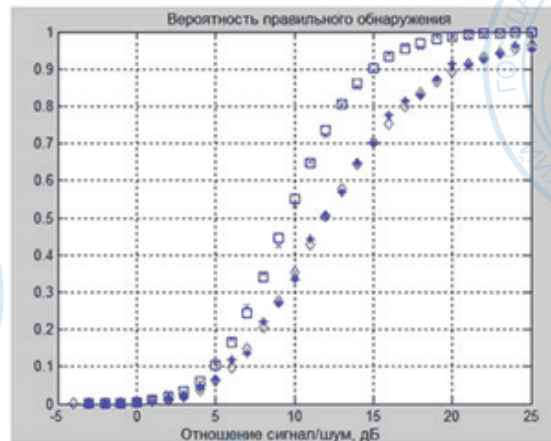


Рис. 2. Характеристики обнаружения двухканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-5}$

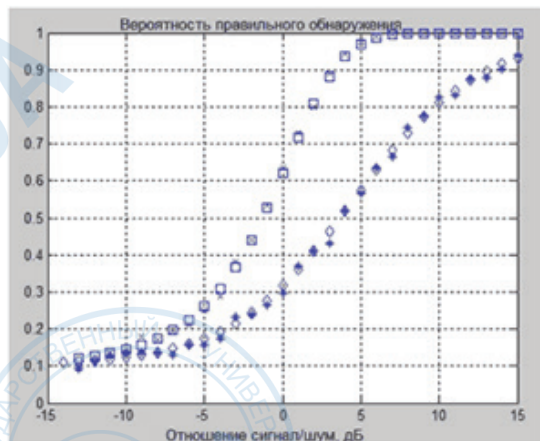


Рис. 3. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-1}$

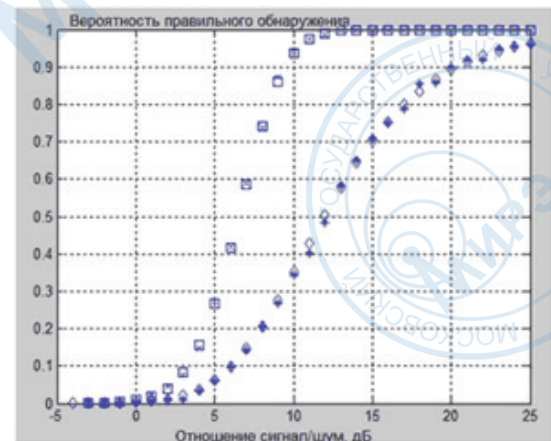


Рис. 4. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы с отбором по максимуму (крестики – моделирование, квадратики – расчет) и с отбором по минимуму (звездочки – моделирование, ромбики – расчет) для $F=10^{-5}$

Влияние межканальной корреляции сигналов до их объединения по максимуму и по минимуму

Теперь целесообразно усложнить рассматриваемую задачу, добавив учет межканальной корреляции полезных сигналов, чтобы приблизить исследование к учету реальной картины, наблюдаемой при построении многоканальных режекторных фильтров, у которых совпадают зоны прозрачности. В этом случае на выходе N канальной схемы с отбором по максимуму и по минимуму вероятности ложной тревоги могут быть представлены, как и раньше, формулами (8) и (9), соответственно. Отметим, что при аналитическом определении вероятностей правильного обнаружения возникают непреодолимые трудности, поэтому вероятности правильного обнаружения рассчитывали только методом статистического моделирования, результаты которого представлены на рис. 5–8.

Из информации, представленной на рис. 5–8, следует, что межканальная корреляция полезных сигналов в меньшей мере влияет на преимущества схемы с отбором по максимуму по сравнению со схемой с отбором по минимуму в отличие от ситуации, когда полезные сигналы

не коррелированы. Более того, при малых вероятностях ложной тревоги схема отбора по минимуму может дать небольшой выигрыш в эффективности.

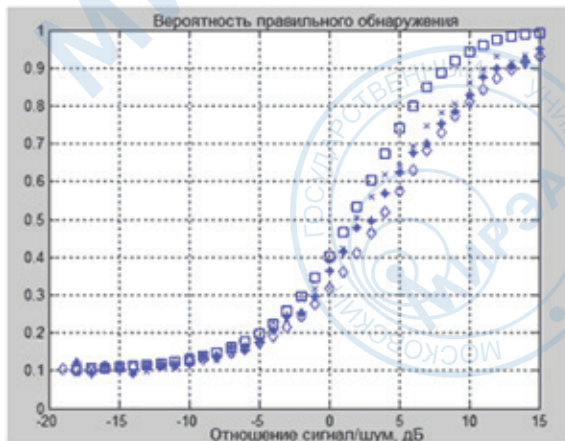


Рис. 5. Характеристики обнаружения двухканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R=0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F=10^{-1}$

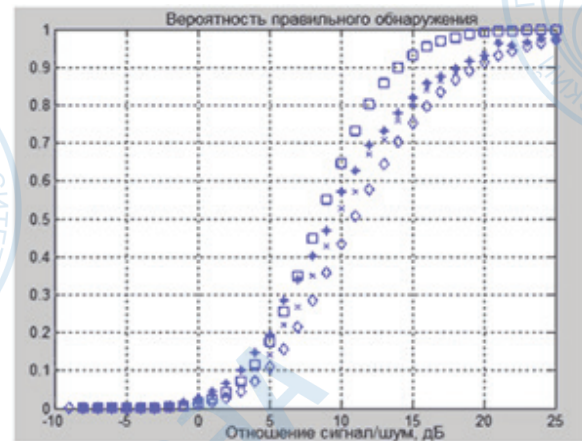


Рис. 6. Характеристики обнаружения двухканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R=0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F=10^{-5}$

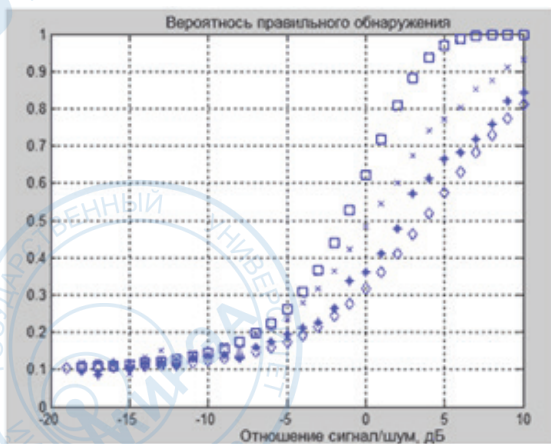


Рис. 7. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R = 0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F = 10^{-1}$

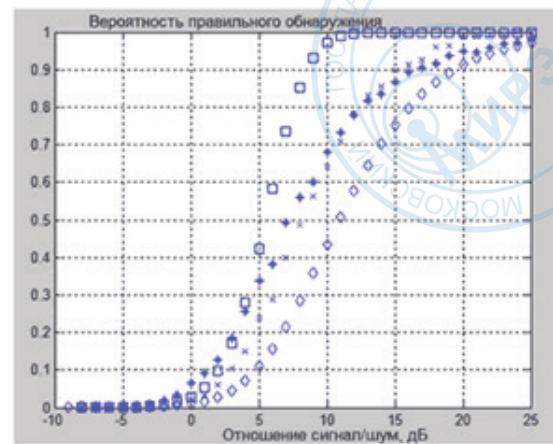


Рис. 8. Характеристики обнаружения восьмиканальной схемы для межканального коэффициента корреляции $R = 0.99$ с отбором по максимуму (крестики) и с отбором по минимуму (звездочки) и для межканального коэффициента корреляции, равным $R = 0$, с отбором по максимуму (квадратики) и с отбором по минимуму (ромбики) для $F = 10^{-5}$

Заключение

Анализ эффективности двух схем объединения каналов по максимуму и по минимуму по характеристикам обнаружения показал, что при любом числе независимых каналов предпочтение следует отдавать схеме с отбором по максимуму. При этом потери в пороговом сигнале для этих сравниваемых схем возрастают с увеличением числа объединяемых каналов. В частности, для 8 независимых каналов и вероятности ложной тревоги 10^{-5} потери в пороговом сигнале для вероятности правильного обнаружения 0.9 составляют 12 дБ. Анализ влияния межканальной корреляции для схем объединения каналов делает отбор по максимуму и по минимуму близкими по эффективности, с одной стороны, ухудшая эффективность для схемы

с отбором по максимуму, с другой – повышая эффективность схемы с отбором по минимуму. При этом для малых вероятностей ложной тревоги и сильной межканальной корреляции схема отбора по минимуму может дать незначительный выигрыш в эффективности.

Литература:

1. Бартенева В.Г. Эффективность объединения квадратурных каналов // Современная электроника. 2010. Вып. 2. С. 78–80.
2. Корляков В.В., Бартенева В.Г., Битюков В.К., Григорьев Л.Н. Всероссийский НИИ радиотехники – 90 лет лидерства // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2011. № 2(6). С. 110–121.
3. Бартенева В.Г., Симачков Д.С., Битюков В.К. Способ адаптивной фильтрации дискретных коррелированных помех // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2012. № 2(8). С. 48–51.
4. Бартенева В.Г., Симачков Д.С., Битюков В.К. Способ подавления дискретных коррелированных помех на основе нахождения координат центра окружности вектора полезного сигнала // Научные технологии. 2013. Т. 14. № 10. С. 4–10.
5. Бартенева В.Г., Симачков Д.С., Битюков В.К. Селектор движущихся целей на фоне дискретных движущихся пассивных помех: пат. 133327 Рос. Федерация. № 2012143984/07; заявл. 16.10.2012; опубл. 10.10.2013.
6. Бартенева В.Г., Бартенева М.В., Битюков В.К. Коэффициент улучшения адаптивных систем селекции движущихся целей авторегрессионного типа // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 3(15). С. 88–92.
7. Бартенева В.Г., Битюков В.К., Конев А.А. Анализ эффективности адаптивной системы СДЦ разностно-фазового типа // Сб. докл. 17-й междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» DSPA-2015. Москва, 2015. Т. 1. С. 307–311.
8. Бартенева В.Г. Квазиоптимальные адаптивные алгоритмы обнаружения сигналов // Современная электроника. 2011. Вып. 2. С. 70–73.
9. Бартенева В.Г., Битюков В.К., Конев А.А. Анализ эффективности адаптивной разностно-фазовой системы СДЦ авторегрессионного типа // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1(6). С. 82–95.
10. Рындык А.Г., Рябков А.П., Ястребов В.Д. Многоканальный режекторный фильтр с отбором по минимуму // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 4. С. 81–85.

УДК: 681.883.41

АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

В.Е. Денисов, доцент

*Кафедра теоретической радиотехники и радиофизики
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: dvemirea@mail.ru*

В статье рассматриваются искажения высокочастотных акустических импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в гидроакустическом канале связи, обусловленные неравномерностью частотной характеристики затухания морской среды. Рассмотрены импульсы с прямоугольной, синусоидальной и типа «приподнятый косинус» огибающими.

Ключевые слова: акустический импульс, девиация частоты, огибающая, гидроакустический канал связи, характеристика затухания морской среды, колебательная часть, аperiodическая часть, предвестник, след, фазовая модуляция, амплитудная модуляция.

ANALYSIS OF DISTORTIONS IN HIGH-FREQUENCY PULSE ACOUSTIC SIGNALS WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION IN A HYDROACOUSTIC COMMUNICATION CHANNELS

V.E. Denisov

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: dvemirea@mail.ru*

The article deals with the distortion of high-frequency acoustic pulses with linear frequency modulation (LFM) in a hydroacoustic communication channel, which is caused by uneven frequency at-tenuation characteristics of the marine environment. The paper considers pulses with rectangular, sinusoidal and «raised cosine» type envelopes.

Keywords: acoustic pulse, frequency deviation, the envelope, hydroacoustic communication channel, attenuation characteristics of the marine environment, the oscillating part, aperiodic part, precursor, post-cursor, phase modulation, amplitude modulation.

Краткая характеристика гидроакустического канала связи

Рассматриваемый в настоящей работе гидроакустический канал связи (ГАКС) состоит из передающей и приемной антенн и морской среды. Антенны считаются идеальными, частотно независимыми. В качестве модели морской среды принята модель в виде изотропной, однородной, линейной среды с частотно зависимым коэффициентом затухания $\alpha(f)$. Используя аппроксимацию $\alpha(f)$ функцией $\alpha_k(f) = B_k + D_k f^2$ из работы [1], можно представить комплексный коэффициент передачи ГАКС $H(j\omega)$ в форме, удобной для аналитических исследований:

$$H(j\omega) = H(0) \exp(-a\omega^2 - j\omega t_3), \quad (1)$$

где ω – угловая частота, рад/с;

$$H(0) = \exp(-0.115 B_K R), \quad a = 0.115(2\pi)^{-2} 10^{-6} D_K R, \quad (2)$$

$t_3 = R/C$, R – расстояние между передающей и приемной антеннами, км; $C = 1.5$ км/с – скорость звука в морской среде.

Для аппроксимации 1: $B_1 = 0$, $D_1 = \frac{0.036}{\sqrt{f_0}}$. Для аппроксимации 8:

$B_8 = 1.9 \cdot 10^{-3} f_B^{1.5}$, $D_8 = \frac{0.036}{\sqrt{f_B}}$, где f_0, f_B – несущая частота и верхняя частота рабочего диапазона в килогерцах соответственно.

Частотной характеристике (1) соответствует импульсная характеристика вида

$$h(t) = H(0)(2\sqrt{\pi a})^{-1} \exp\left[-\frac{(t-t_3)^2}{4a}\right], \quad (3)$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика, с⁻¹; t – время, с; $H(0)$ – безразмерный коэффициент из (2); a – коэффициент из (2), с².

Сигнал на входе ГАКС далее обозначается как $s_1(t)$, а на выходе – $s_2(t)$.

Анализ искажений прямоугольного высокочастотного акустического импульса с линейной частотной модуляцией

Найдем реакцию ГАКС $S_2(t)$ на прямоугольный импульс с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ)

$$S_1(t) = \Pi_1(t) \cos(\omega_1 t + b_1 t^2 + \varphi_1), \quad (4)$$

где $\Pi_1(t) = I(t) - I(t - T_1)$, T_1 – длительность импульса, $b_1 = \frac{\mu_1}{2}$, μ_1 – скорость изменения частоты, ω_1 – значение частоты при $t = 0$.

При этом удобно воспользоваться интегралом свертки

$$S_2(t) = \int_0^{T_1} S_1(\tau) h(t - \tau) d\tau. \quad (5)$$

Представив $\cos(\cdot)$ в комплексной форме, выражение (5) можно привести к виду

$$S_2(t) = (2\sqrt{\pi a})^{-1} H(0) \operatorname{Re} \left\{ \int_0^{T_1} \exp[-(4a)^{-1}(t - t_3 - \tau)^2 + j(\omega_1 \tau + b_1 \tau^2 + \varphi_1)] d\tau \right\} \quad (6)$$

Интеграл в (6) путем дополнения показателя экспоненты до полного квадрата можно выразить через интеграл вероятности от комплексного аргумента $W(z)$, табулированного в [2]. После некоторых преобразований, по аналогии с [3], можно получить

$$S_2(t) = S_{21}(t) + S_{22}(t) + S_{23}(t), \quad (7)$$

где колебательная $S_{21}(t)$ и аperiodические $S_{22}(t)$, $S_{23}(t)$ составляющие определяются соответствующими выражениями.

Длительность $T_2 = t_2 - t_1 = n^2 T_1$ колебательной составляющей увеличивается ($n > 1$), частота $\omega_2 = \omega_1 n^4$, параметр, пропорциональный скорости изменения частоты, $b_2 = b_1 n^4$, и девиация частоты $\Delta\omega_2 = 2b_2 T_2 = \Delta\omega_1 n^2$ уменьшаются. Это уменьшение тем значительнее, чем больше

девиация частоты $\Delta\omega_1 = 2b_1T_1$ сигнала $S_1(t)$ и неравномерность частотной характеристики затухания. При отсутствии частотной модуляции $\Delta\omega_1 = 0$ и $n = 1$, поэтому $T_2 = T_1$, $\omega_2 = \omega_1$, что соответствует результатам работы [3]. Как показывают расчеты, при $T_1 \geq 0.1$ мс, $R \leq 3$ км, $\Delta F_1 \leq 100$ кГц, $f_B \leq 100$ кГц величина $n \leq 1.04$.

Кроме изменения указанных параметров, сигнал $S_{21}(t)$ приобретает и амплитудную модуляцию по закону $A_2(t)$. Сигнал $S_{21}(t)$ уменьшается с ростом частоты ω_1 и дальности R в большей степени, чем сигналы $S_{22}(t)$ и $S_{23}(t)$ [3]. Составляющие $S_{22}(t)$ и $S_{23}(t)$ имеют форму видеопульсов сосредоточенных соответственно в окрестностях $t = t_3$ и $t = t_3 + n_1^2T_1$. Часть $S_{22}(t)$ при $t < t_3$ формирует предвестник выходного сигнала, а часть $S_{23}(t)$ при $t > t_3 + n_1^2T_1$ его след.

Составляющие $S_{22}(t)$ и $S_{23}(t)$ идентичны по форме и отличаются друг от друга знаком, смещением на время $n^2 T_1$ и амплитудой. Амплитуда $S_{22}(t)$ больше амплитуды $S_{23}(t)$, и это отличие увеличивается с ростом $\Delta\omega_1$. Длительности предвестника и следа выходного сигнала будут равны $0.5\Delta T_h$, где ΔT_h – длительность импульсной характеристики $h(t)$ из работы [3].

По полученным формулам для аппроксимации [1] рассчитаны временные диаграммы сигналов $S_2(t)$ и $S_{2c}(t) = S_{22}(t) + S_{23}(t)$, приведенные на рис. 1–3 при $R=2$ км, $f_B = 80$ кГц и t в миллисекундах.

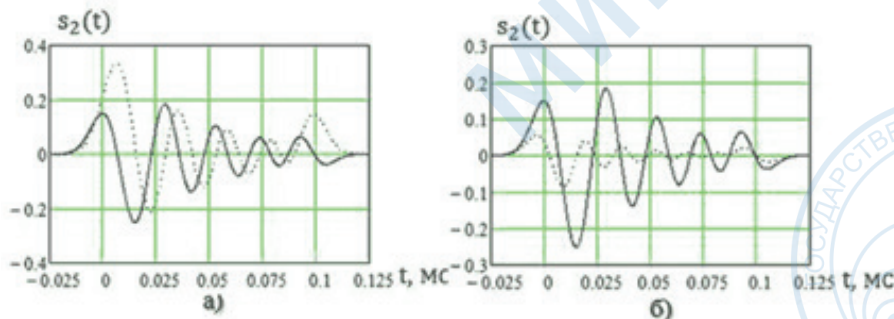


Рис. 1. Временные диаграммы сигнала $S_2(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс, $\Delta F_1 = 30$ кГц: а) $\varphi_1 = 30$ кГц: — $\varphi_1 = 0$, - - - $\varphi_1 = -\pi/2$; б) $\varphi_1 = 0$: — $-f_1 = 30$ кГц, - - - $-f_1 = 50$ кГц.

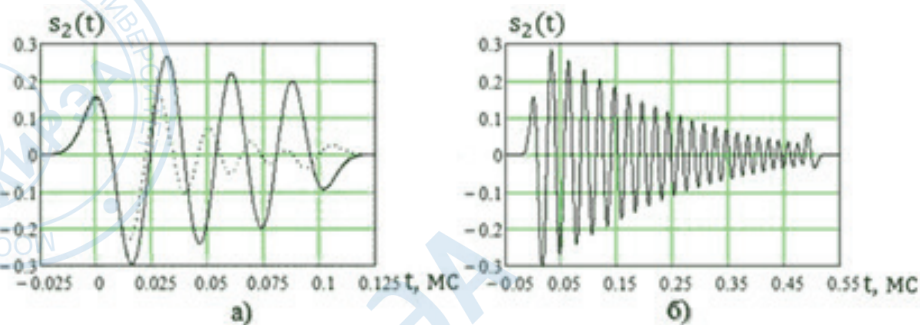


Рис. 2. Временные диаграммы сигнала $S_2(t)$ при $f_1 = 30$ кГц, $\varphi_1 = 0$: а) $T_1 = 0.1$ мс: — $\Delta F_1 = 10$ кГц, - - - $\Delta F_1 = 40$ кГц; б) $T_1 = 0.5$ мс, $\Delta F_1 = 30$ кГц.

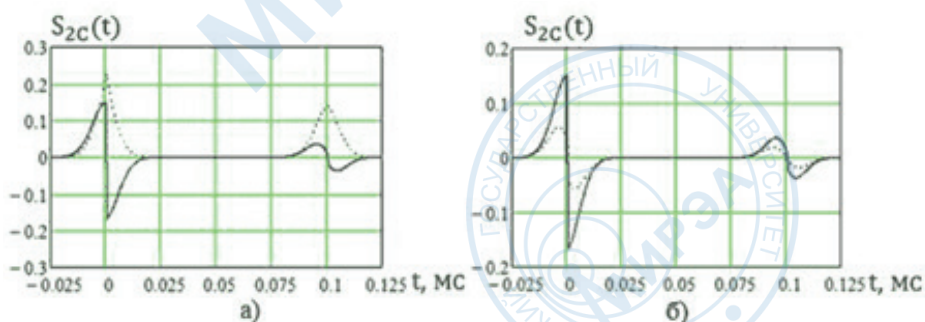


Рис. 3. Временные диаграммы аperiodической составляющей $S_{2c}(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс, $\Delta F_1 = 30$ кГц: а) $f_1 = 30$ кГц: — $\varphi_1 = 0$, - - - $\varphi_1 = -\pi/2$; б) $\varphi_1 = 0$: — $-f_1 = 30$ кГц, - - - $-f_1 = 50$ кГц.

Апериодическая составляющая $S_{2c}(t)$ не зависит от длительности T_I сигнала $S_I(t)$, но зависит от его начальной фазы φ , начальной частоты f_I и девиации частоты ΔF_I . Имеет место, как и в [3], тенденция трансформации высокочастотного сигнала $S_I(t)$ в два видеоимпульса при увеличении f_I и R и дополнительно за счет увеличения ΔF_I .

Выражение (7) можно преобразовать также к виду

$$S_{2B}(t) = A_{2S}(t) \cos(\psi_{2S}(t)), \tag{8}$$

где $A_{2S}(t)$ – огибающая сигнала, а $\Psi_{2S}(t)$ – его фаза:

$$A_{2S}(t) = \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos(\alpha - \beta)}, \tag{9}$$

$$\text{tg}(\psi_{2S}(t)) = \frac{(A \sin \alpha - B \sin \beta)}{(A \cos \alpha - B \cos \beta)}, \tag{10}$$

где $A = A_2(t, \omega_2) \Pi_2(t, \omega_2)$, $B = A_2(t, \omega_1) \Pi_2(t, \omega_1)$,
 $\alpha = \Omega(\omega_2)t + b_2 t^2 + \varphi_2(\omega_2)$, $\beta = \Omega(\omega_1)t + b_1 t^2 + \varphi_1(\omega_1)$.

По приведенным выше формулам для аппроксимации [1] рассчитаны графики зависимостей $S_{2c}(t)$, $S_2(t)$, приведенные на рис. 4, 5 при $R=2$ км, $f_B = 80$ кГц и t в миллисекундах.

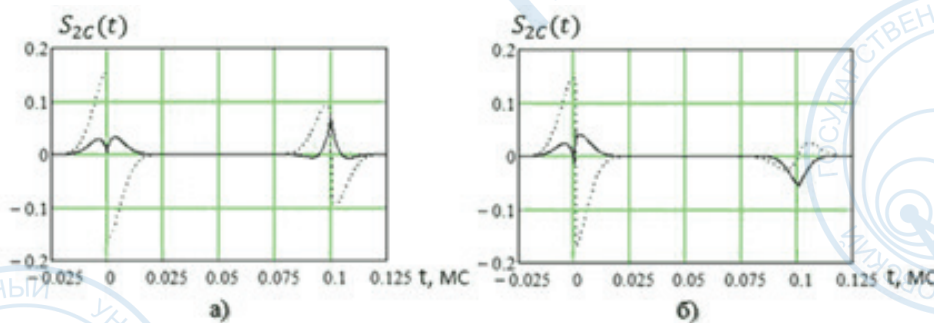


Рис. 4. Зависимость $S_{2c}(t)$ при $T_I = 0.1$ мс: — \sin -импульс, - - - прямоугольный импульс; а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

На рис. 4 в случае \sin -импульса масштаб увеличен в 5 раз. Поэтому, как следует из рис. 1, для \sin -импульса апериодическая составляющая существенно меньше, чем для прямоугольного и уменьшается в окрестности $t = T_I$ с ростом девиации частоты. Следовательно, эффективные длительности предвестника и следа для \sin -импульса значительно меньше, чем для прямоугольного.

На рис. 6, 7 приведены графики зависимостей огибающей $A_{2S}(t)$ и мгновенной частоты

$$f_{2S}(t) = \frac{(2\pi)^{-1} d\psi_{2S}(t)}{dt}.$$

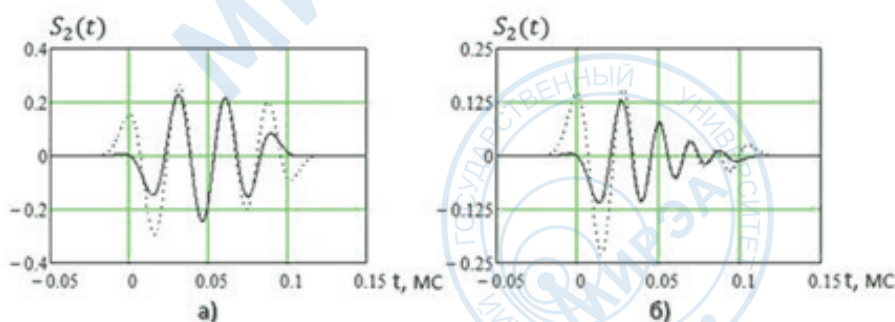


Рис. 5. Зависимость $S_2(t)$ при $T_I = 0.1$ мс: — \sin -импульс, - - - прямоугольный импульс; а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

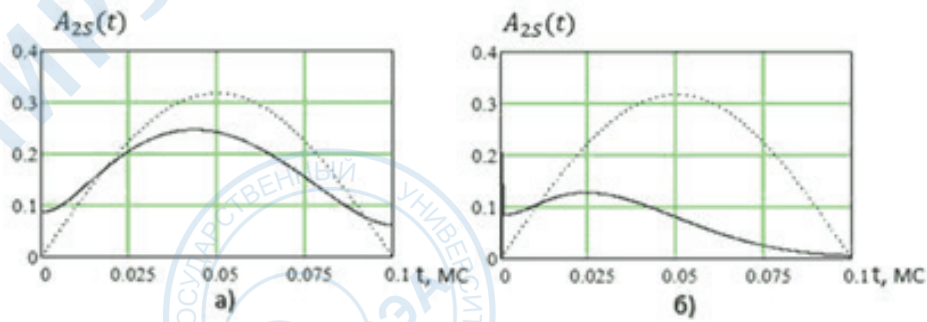


Рис. 6. Зависимость $A_{2S}(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс: — \sin -импульс, - - - среда без искажений; а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

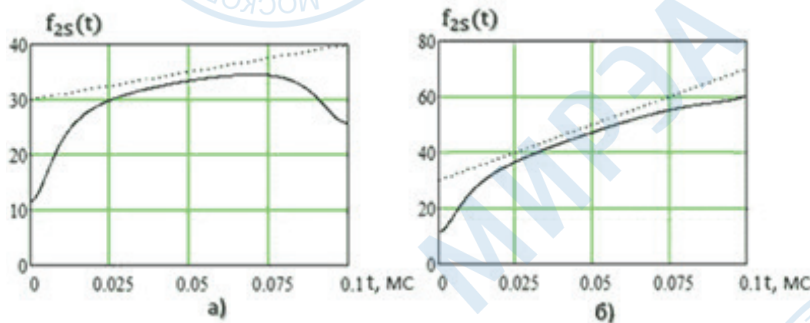


Рис. 7. Зависимость $f_{2S}(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс: — \sin -импульс, - - - среда без искажений; а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

Как следует из рис. 6, с ростом ΔF искажения огибающей увеличиваются. Зависимость мгновенной частоты от времени (рис. 7) отличается от линейной, и мгновенная частота выходного сигнала всегда меньше частоты входного сигнала. Искажения уменьшаются с увеличением длительности T_1 и уменьшением дальности R .

Анализ искажений высокочастотного акустического импульса с ЛЧМ и огибающей типа «приподнятый косинус»

Найдем реакцию $S_2(t)$ ГАКС на \cos -импульс ЛЧМ:

$$S_1(t) = 0.5\Pi_1(t)(1 - \cos(\nu T)) \cos(\omega_0 t + b_1 t^2 + \varphi_0), \quad (11)$$

где $\Pi_1(t) = 1(t) - 1(t - T_1)$, T_1 – длительность импульса, $b_1 = (\pi\Delta F)/T_1$; ΔF – девиация частоты, Гц; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – значение частоты при $t = 0$; $\nu = \frac{2\pi}{T_1}$.

Сигнал $S_1(t)$ можно представить в виде линейной комбинации трех прямоугольных импульсов с ЛЧМ с разными начальными частотами

$$S_1(t) = 0.5S_{1П}(t, \omega_0) - 0.25S_{1П}(t, \omega_2) - 0.25S_{1П}(t, \omega_1), \quad (12)$$

где $S_{1П}(t, \omega_K) = \Pi_1(t) \cos(\omega_K t + b_1 t^2 + \varphi_0)$, $\omega_1 = \omega_0 - \nu$, $\omega_2 = \omega_0 + \nu$.

Таким образом, задача определения реакции морской среды на \cos -импульс с ЛЧМ сводится к задаче определения реакции на прямоугольный импульс с ЛЧМ, решенной в п. 2. Используя эти результаты, сигнал $S_2(t)$ можно представить в следующем виде

$$S_2(t) = S_{2B}(t) + S_{2C}(t), \quad (13)$$

где $S_{2B}(t)$ – колебательная, а $S_{2C}(t)$ – аperiодическая составляющие, определяемые по формулам

$$S_{2B}(t) = \sum_{v=0}^2 [0.5 - 0.75 \text{sign}(v)] S_{21}(t, \omega_v), \quad (14)$$

$$S_{2C}(t) = S_{2C1}(t) + S_{2C2}(t), \quad (15)$$

$$S_{2C1}(t) = \sum_{v=0}^2 [0.5 - 0.75 \text{sign}(v)] S_{22}(t, \omega_v), \quad (16)$$

$$S_{2C2}(t) = \sum_{v=0}^2 [0.5 - 0.75 \text{sign}(v)] S_{23}(t, \omega_v), \quad (17)$$

Сигналы $S_{21}(t, \omega_K)$, $S_{22}(t, \omega_K)$, $S_{23}(t, \omega_K)$ представляют собой составляющие реакции $S_{2П}(t, \omega_K)$ на прямоугольный импульс с ЛЧМ $S_{1П}(t, \omega_K)$ с начальной частотой ω_K :

$$S_{2П}(t, \omega_K) = S_{21}(t, \omega_K) + S_{22}(t, \omega_K) + S_{23}(t, \omega_K). \quad (18)$$

Используя результаты п. 2, можно получить следующие выражения для этих составляющих

$$S_{21}(t, \omega_K) = A_2(t, \omega_K) \Pi_2(t, \omega_K) \cos[\Omega(\omega_K) \mathcal{G} + b_2 \mathcal{G}^2 + \varphi_2(\omega_K)] \quad (19)$$

с заданными зависимостями каждой из входящих компонент.

Выражение (14) можно преобразовать также к виду

$$S_{2B}(t) = A_{2C}(t) \cos(\psi_{2C}(t)), \quad (20)$$

где $A_{2C}(t)$ – огибающая сигнала, а $\psi_{2C}(t)$ – его фаза, определяемые формулами

$$S_{2C}(t) = \sqrt{A_{2C1}^2 + A_{2C2}^2}, \quad (21)$$

$$A_{2C1} = B_0^2 + B_1^2 + B_2^2 - 2B_0B_1 \cos(\beta_0 - \beta_1), \quad (22)$$

$$A_{2C2} = +2B_1B_2 \cos(\beta_1 - \beta_2) - 2B_0B_2 \cos(\beta_0 - \beta_2), \quad (23)$$

$$\text{tg}(\psi_{2C}(t)) = \frac{B_0 \sin \beta_0 - B_1 \sin \beta_1 - B_2 \sin \beta_2}{B_0 \cos \beta_0 - B_1 \cos \beta_1 - B_2 \cos \beta_2} \quad (24)$$

где

$$B_0 = 0.5A_2(t, \omega_0) \Pi_2(t, \omega_0), \quad B_1 = 0.25A_2(t, \omega_1) \Pi_2(t, \omega_1),$$

$$B_2 = 0.25A_2(t, \omega_2) \Pi_2(t, \omega_2), \quad \beta_K = \Omega(\omega_K)t + b_2 t^2 + \varphi_2(\omega_K),$$

Текущей фазе $\psi_{2C}(t)$ можно сопоставить мгновенную частоту $f_{2C}(t)$:

$$f_{2C}(t) = \frac{(2\pi)^{-1} d\psi_{2C}(t)}{dt}.$$

По приведенным выше формулам для аппроксимации [1] рассчитаны графики зависимостей $S_{2C}(t)$, $S_2(t)$, изображенные на рис 8, 9. На этих же рисунках для сравнения приведены аналогичные графики для *sin*-импульса с ЛЧМ. Все расчеты проводили при условиях: $f_0 = 30$ кГц, $f_B = 80$ кГц, $\varphi_0 = 0$, $R = 2$ км, t в миллисекундах.

Как видно из рис 8, для *cos*-импульса апериодическая составляющая заметно меньше и уже, чем для *sin*-импульса. Поэтому эффективные длительности предвестника и следа для *cos*-импульса меньше по сравнению с *sin*-импульсом.

На рис. 10, 11 приведены графики зависимостей огибающей $A_{2C}(t)$ и мгновенной частоты $f_{2C}(t)$.

Как следует из рис. 10, с ростом ΔF искажения огибающей увеличиваются. Искажения огибающей у *cos*-импульса меньше, чем у *sin*-импульса, а краевые искажения мгновенной частоты больше. Зависимость мгновенной частоты от времени (рис. 11) отличается от линейной,

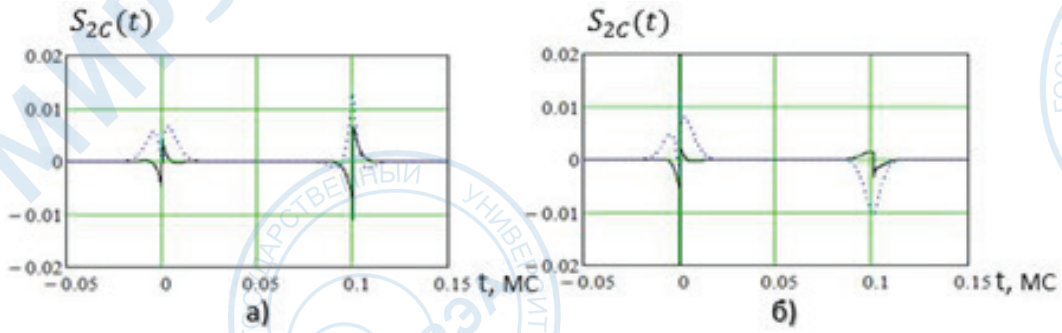


Рис. 8. Зависимость $S_{2c}(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс: — — \cos -импульс, - - - \sin -импульс;
а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

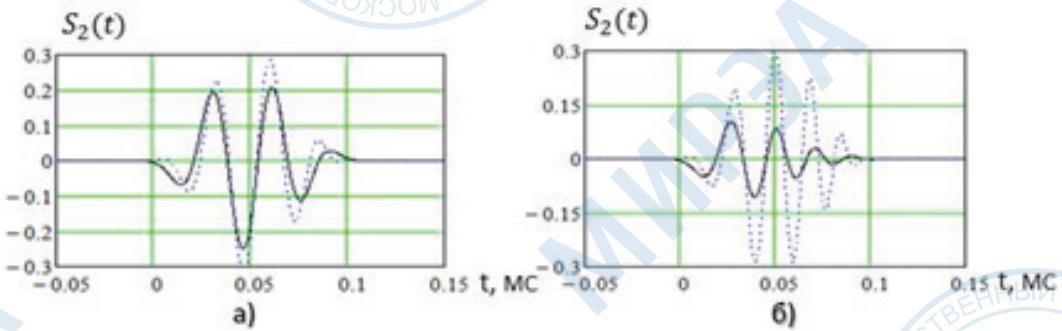


Рис. 9. Зависимость $S_2(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс: — — \cos -импульс, - - - в среде без искажений;
а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

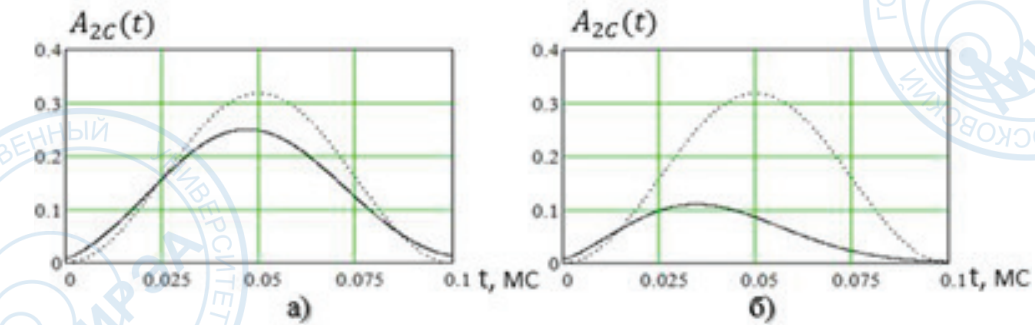


Рис. 10. Зависимость $A_{2c}(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс: — — \cos -импульс, - - - среда без искажений;
а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

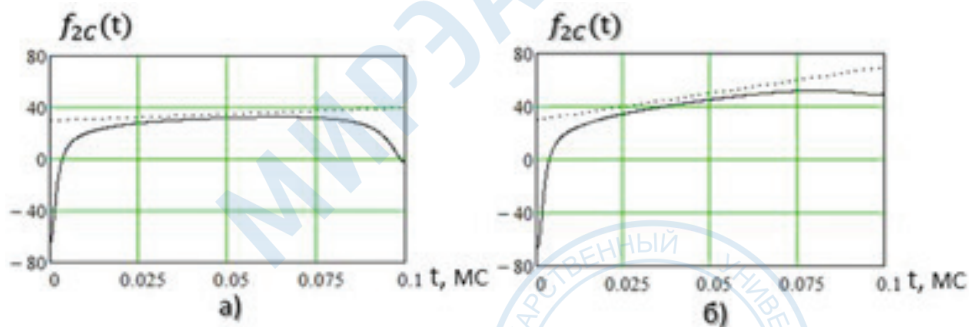


Рис. 11. Зависимость $f_{2c}(t)$ при $T_1 = 0.1$ мс: — — \cos -импульс, - - - среда без искажений;
а) $\Delta F = 10$ кГц; б) $\Delta F = 40$ кГц.

и мгновенная частота выходного сигнала всегда меньше частоты входного сигнала. Искажения уменьшаются с увеличением длительности T_1 и уменьшением дальности R . Краевые искажения мгновенной частоты уменьшаются с ростом частоты f_0 , но при этом увеличиваются искажения огибающей.

Литература:

1. Денисов В.Е. Аппроксимация амплитудно-частотной характеристики гидроакустического канала связи по совокупности показателей качества // Сб. трудов 56-й Научно-технической конф. МИРЭА: М.: МИРЭА, 2007. Ч. 2. Физико-математические науки. С. 71–76.
2. Фаддеева В.Н., Терентьев Н.М. Таблицы значений интеграла вероятностей от комплексного аргумента. М.: ГИТТЛ, 1954. 268 с.
3. Денисов В.Е. // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1. С. 123–133.

УДК: 534.854

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ГЕТЕРОДИННЫМ МЕТОДОМ

А.А. Титов, доцент

В.К. Гарипов, профессор

М.А. Костромин, ст. преподаватель

Московский технологический университет (МГУПИ), Москва, 119454 Россия

Автор для переписки, e-mail: garvad11@gmail.com

В статье рассмотрены вопросы измерения перемещения объектов гетеродинным методом. Установлено, что интерференционные методы обладают наивысшей точностью измерений. Определено, что большинство указанных методов основано на подсчете числа интерференционных полос при смещении объекта, что не позволяет разрешать неоднозначность в положении объекта, а интерференционные методы, основанные на сдвиге частот интерферирующих пучков (гетеродинная интерферометрия) используются для абсолютных измерений положения объекта. Показано, что при реализации этих методов необходимы двухчастотные лазеры, достаточно сложные оптические и электронные системы, что значительно затрудняет их применение в измерительных устройствах. Предложен метод разрешения неоднозначности в определении положения объекта, в котором период интерференционной картины может быть равен диапазону измерения, позволяющий устранить указанные недостатки.

Ключевые слова: измерение, линейные перемещения, объекты, гетеродинный метод, интерференционные методы, двухчастотный лазер, акустооптический модулятор пучков.

MEASUREMENT OF MOVEMENT OF OBJECTS BY THE HETERODYNE METHOD

A. A. Titov,

V. K. Garipov,

M. A. Kostromin

Moscow Technological University (MGUPI), Moscow, 119454 Russia

Corresponding author e-mail: garvad11@gmail.com

In this paper the issues of object movements measurement by the heterodyne method have been considered. It has been shown that nowadays in order to measure linear movements various kinds of methods are used. It has been found that interferential methods have the highest accuracy of measurements. It also has been defined that the majority of these methods is based on calculating the number of interferential fringes when objects shift, that does not allow to resolve ambiguity in the object location; and the interferential methods realization based on the frequency shift of interfering beams (heterodyne interferometry) are used for the absolute measurements of the object's location. It has been demonstrated that when realizing these methods two-frequency lasers are required. As they are rather difficult optical and electronic systems, they hinder their application in measuring devices. The non-ambiguity resolution method in the definition of the object easurement range, allowing elimination of the drawbacks specified, has been offered.

Keywords: measurement, linear movements, objects, heterodyne method, interferential methods, two-frequency laser, acousto-optical modulator of beams.

Введение

В настоящее время для измерения линейных перемещений используются различные методы. Среди них интерференционные методы обладают наивысшей точностью измерений. Однако большинство этих методов основано на подсчете числа интерференционных полос при смещении объекта, что не позволяет разрешать неоднозначность в положении объекта. Интерференционные методы, основанные на сдвиге частот интерферирующих пучков (гетеродинная интерферометрия), используются для абсолютных измерений положения объекта [1–4]. Однако при реализации этих методов необходимы двухчастотные лазеры, достаточно сложные оптические и электронные системы, что значительно затрудняет их применение в измерительных устройствах. Для устранения указанных недостатков предложен метод разрешения неоднозначности в определении положения объекта, в котором период интерференционной картины может быть равен диапазону измерения.

Постановка задачи и ее решение

Нами предложен метод, основанный на интерференции двух дифрагированных на акустооптическом модуляторе пучков, на который подаются напряжения двух близко расположенных частот [5]. Устройство для реализации метода приведено на рис. 1. Оно содержит источник излучения 1, в который входит лазер и коллиматор, акустооптический модулятор 2, генераторы высоких частот 3, 4, сумматор 5, фазовый детектор 6, фазометр 7 и фотоприемник 8. Источник 1 освещает акустооптический модулятор (АОМ) 2 плоским волновым фронтом.

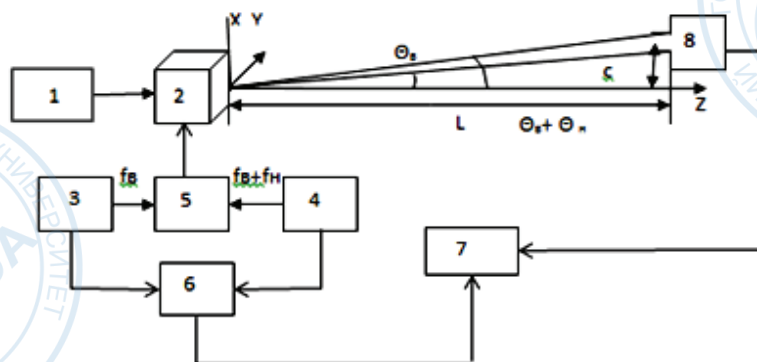


Рис. 1. Схема устройства для измерения продольных и поперечных перемещений объекта.

Совместим плоскость XOY системы координат с выходной плоскостью АОМ, ось Z с направлением распространения падающего пучка света, а начало координат расположим в центре пучка. От генераторов 3 и 4 через сумматор 5 на АОМ 2 подаются два гармонических сигнала с частотами f_g и $f_g + f_n$, где f_g и $f_g + f_n$ – частоты сигналов на выходах генераторов 3 и 4, соответственно. При этом частота $f_g \gg f_n$. Пучок света будет дифрагировать на двух бегущих в АОМ ультразвуковых волнах в плоскости XOZ . Так как углы между дифрагированными пучками малы, пучки будут интерферировать между собой. При перемещении фотоприемника 8 будет меняться фаза сигнала. Для измерения фазы сигнал с фотоприемника 8 подается на первый вход фазометра 7, на второй вход которого подается опорный сигнал с фазового детектора 6, который выделяет разностную частоту f_n генераторов 3 и 4. Фазометр 7 измеряет фазу сигнала, пропорциональную поперечным и продольным перемещениям.

Оценим возможности данного метода, для чего ограничимся рассмотрением дифрагированных пучков плюс первого порядка, так как остальные пучки могут быть отфильтрованы щелью фотоприемника. Тогда амплитуды дифрагированных пучков на выходе АОМ можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 \exp i \left[(\omega_{c_6} + \omega_6) t + kz \cos \theta_6 + kx \sin \theta_n \right]; \\ A_2 &= A_0 \exp i \left[(\omega_{c_6} + \omega_6 + \omega_n) t + kz \cos (\theta_6 + \theta_n) + kx \sin (\theta_6 + \theta_n) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $k = 2\pi n / \lambda$ – волновое число;
 λ – длина волны света в вакууме;
 $\theta_6 = \lambda f_6 / v_{зв} n_6, \theta_n = \lambda f_n / v_{зв} n_6$ – углы дифракции света;
 n_6 – показатель преломления воздуха;
 $v_{зв}$ – скорость звука в АОМ;
 A_0 – амплитуда дифрагированного пучка;
 ω_{c_6} – частота света.

Положим, что фотоприемник **8** расположен на расстоянии $z = L$ от АОМ **2** и смещен в поперечном направлении на $x = c$, углы дифракции θ_6 и θ_n малы, а дифрагированные пучки интерферируют в плоскости фотоприемника. Тогда с учетом изложенного можно получить выражения для сигнала на выходе фотоприемника **8**, в котором учтен только интерференционный член:

$$\begin{aligned} U &= A_0^2 S_{\Phi\Pi} l_{uy} \int_{c - \frac{l_{ux}}{2}}^{c + \frac{l_{ux}}{2}} \left[\exp i (\omega_{c_6} + \omega_6) t + kL \cos \theta_n + kx \sin \theta_6 \right] + \\ &+ \exp i \left[(\omega_{c_6} + \omega_6) t + kL \cos (\theta_6 + \theta_n) + kx \sin (\theta_6 + \theta_n) \right] dx = \\ &= A_0^2 S_{\Phi\Pi} S_{uy} \sin c \left[kl_{ux} \sin \frac{\theta_n}{2} \cos \left(\theta_6 + \frac{\theta_n}{2} \right) \right] \cos \left[\omega_n t + 2kL \sin \left(\theta_6 + \frac{\theta_n}{2} \right) \sin \frac{\theta_n}{2} - \right. \\ &\left. - 2kc \sin \frac{\theta_n}{2} \cos \left(\theta_6 + \frac{\theta_n}{2} \right) \right] \approx A_0^2 S_{\Phi\Pi} S_{uy} \sin c \left(\frac{kl_{ux}}{2} \theta_n \right) \cos (\omega_n t - \varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $\varphi = \frac{2\pi c}{\Lambda_n} - \frac{2\pi c \theta_6 L}{\Lambda_n}$ – фаза сигнала;

$\Lambda_n = \frac{v_{зв} n_6}{f_n}$ – период интерференционной картины;

$S_{uy} = l_{ux}, l_{uy}$ – размеры щели фотоприемника по координатам x и y ;

$S_{\Phi\Pi}$ – чувствительность фотоприемника.

Фазометр **7** измеряет фазу φ , которая пропорциональна поперечному c и продольному L положению фотоприемника **8**. Период интерференционной картины можно менять посредством перестройки частоты генератора **3** или **4**. Оценим диапазон и точность измерения устройства. При оценке диапазона измерения продольного положения необходимо определить, какой максимальный угол $\theta_{n, \max}$ между интерферирующими пучками можно допустить, чтобы происходила интерференция в пределах измерения расстояния L . Это можно найти из следующих двух условий [6, 7]:

1. Выберем ширину области интерференции по координате x не менее половины ширины пучка d_n . Тогда, используя рис. 1, получим:

$$\theta_{n \max} \leq d_n / 2L_{\max}. \quad (3)$$

2. Анализируя функцию $\text{sinc}(kl_{ux}/2)\theta_n$, выберем входящие в нее параметры так, чтобы

$$\sin c \left| \frac{kl_{\text{ух}}}{2} \Theta_H \right| \geq 0,7 .$$

Отсюда найдем

$$k (l_{\text{ух}}/2) \theta_{\text{H max}} \leq \pi/2. \tag{4}$$

Учитывая выражения (3) и (4), получим:

$$L_{\text{max}} \leq l_{\text{ух}} d_n / \lambda. \tag{5}$$

Из выражения (5) видно, что для увеличения L_{max} нужно увеличивать диаметр дифрагированного пучка. Это можно сделать, если освещающий АОМ коллимированный лазерный пучок будет иметь некоторую расходимость. Тогда выражение (5) можно преобразовать к виду:

$$L_{\text{max}} \leq \frac{l_{\text{ух}} d_0}{\lambda \left(1 - \alpha \frac{l_{\text{ух}}}{\lambda} \right)}. \tag{6}$$

Здесь d_0 – размер пучка на выходе АОМ 2. При этом, как показано в [3], условия согласования волновых фронтов не нарушаются. Для разрешения неоднозначности в измерении продольных и поперечных координат объекта минимальные частоты нужно выбрать из условия

$$[8]: \varphi = \frac{2\pi c \theta_{\text{в}} L_{\text{max}}}{\Lambda_n} = 2\pi \text{ при } c = 0, \quad \varphi = \frac{2\pi c_{\text{max}}}{\Lambda_n} = 2\pi \text{ при } L = 0.$$

Тогда из этих двух выражений получим:

$$(f_{\text{H min}})_{\text{прод}} = \frac{v_{\text{зв}}^2 n_B}{c_{\text{max}}}, \quad (f_{\text{H min}})_{\text{поп}} = \frac{v_{\text{зв}} n_{\text{в}}}{c_{\text{max}}}. \tag{7}$$

Определим максимально возможную частоту $f_{\text{H max}}$ при проведении точных измерений продольных и поперечных координат объекта.

С учетом выражений (2), (3) и (5) получим:

$$f_{\text{H max}} \leq v_{\text{зв}} n_{\text{в}} / 2l_{\text{ух}}. \tag{8}$$

Оценим точность измерений. При этом возможны два режима измерения: грубый (для разрешения неоднозначности) и точный. Частоту f_{H} можно выбрать для соответствующего режима из (7) или (8). Рассмотрим сначала точный режим измерений. Выразим из (2) L и c при $f_{\text{H max}}$.

$$L = \frac{v_{\text{зв}}^2 n_{\text{в}} \varphi}{2\pi \lambda f_{\text{H max}} f_B} \text{ при } c = 0, \quad c = \frac{\varphi v_{\text{зв}} n_{\text{в}}}{2\pi f_{\text{H max}}} \text{ при } L = 0. \tag{9}$$

Для нахождения влияния ошибок от каждого параметра на точность измерения воспользуемся известным методом дифференцирования передаточной функции по параметрам, имеющим ошибки. Параметры, входящие в выражения (8), являются независимыми и изменяются случайным образом. Поэтому ошибку измерения будем находить как случайную [9]

$$\Delta L = \sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial P_i} \right)^2 (\Delta P_i)^2} \quad \Delta C = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial P_i} \right)^2 (\Delta P_i)^2} \tag{10}$$

здесь $\frac{\partial L}{\partial P_i}$ и $\frac{\partial C}{\partial P_i}$ – коэффициенты влияния ошибок;

P_i – один из входящих в выражение (10) параметров.

Оценим входящие в выражения (10) погрешности отдельных параметров. Для современных фазометров погрешность измерения фазы не превосходит 1° , т.е. $\Delta\varphi = 1^\circ$. Относительная погрешность изменения длины волны $\Delta\lambda/\lambda = (2 \div 6) \cdot 10^{-7}$, показатель преломления воздуха $\Delta n_b = 10^{-7} \div 10^{-6}$, относительная погрешность изменения частоты генераторов $\Delta f/f = 10^{-4}$. Погрешность от изменения скорости звука в модуляторе можно найти если воспользоваться выражением для скорости звука из [10]:

$$v_{\text{зв}} = [n_0 + \beta(t - 20^\circ)]^2 \sqrt{\frac{\rho^2}{m\rho}}. \quad (11)$$

Здесь n_0 – показатель преломления среды модулятора при $t = 20^\circ\text{C}$;

m – коэффициент акустооптической эффективности;

ρ – плотность среды;

p – упругооптическая постоянная;

β – приращение показателя преломления.

Из выражения (11) видно, что на скорость звука основное влияние оказывает изменение температуры среды. Дифференцируя по t и находя из полученного выражения ошибку Δv , можно получить:

$$\Delta v_{\text{зв}} = \frac{2\beta\Delta t}{n_0} v_{\text{зв}} \Big|_{t=20^\circ} \quad (12)$$

Полагая $\beta = 2 \cdot 10^{-6}$, $v_{\text{зв}} = 4 \cdot 10^6$ мм/с и $\Delta t = 40^\circ\text{C}$, $n_0 = 2$, из (12) имеем $\Delta v_{\text{зв}} = 320$ мм/с.

Аналогично определены коэффициенты влияния ошибок для приведенных выше значений параметров и их ошибок. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Как можно видеть из табл. 1, наибольшее значение на точность измерений оказывает погрешность, вносимая фазометром 7. Влияние остальных погрешностей незначительно. Таким образом, предложенный метод позволяет производить абсолютные измерения перемещений объекта. Однако точность рассмотренного метода недостаточно высока, поскольку период полученной интерференционной картины достаточно большой (единицы миллиметра).

С целью повышения точности путем уменьшения периода этой картины предложено использовать дифрагированные на акустооптическом модуляторе (АОМ) пучки первого и нулевого порядков, с помощью которых линза строит изображение созданной в АОМ дифракционной решетки. Передвигая линзу вдоль оптической оси, можно менять увеличение и тем самым период картины. Схема измерения перемещений приведена на рис. 2, где показаны только центральные лучи пучков. Будем считать лазерный пучок гомоцентрическим, апертуры АОМ и линзы много больше диаметров пучков, падающих на эти элементы.

На АОМ подается напряжение одной частоты, на фотоприемнике интерферируют пучки нулевого и первого порядков, последний располагается в плоскости изображения, положение которой удовлетворяет формуле отрезков [11].

$$1/d_2 - 1/d_1 = 1/f', \quad (13)$$

здесь f' – фокусное расстояние линзы;

d_1 и d_2 – расстояние между элементами схемы, согласно рис. 2.

Применяя к пучкам преобразование Френеля, при условии $L \gg d_1$ и соблюдения условия

Таблица 1. Результаты расчетов коэффициентов влияния ошибок

Параметр	Коэффициенты влияния ошибок и их значения		Ошибки	
	Продольная координата	Поперечная координата	Продольная координата	Поперечная координата
Фаза φ	$\frac{v_{\text{за}}^2 n_a}{2\pi\lambda f_{H \max} f_B} = 0,03$	$\frac{v_{\text{за}}}{2\pi f_B} = 2,8 \cdot 10^{-3}$	0.032	$2.8 \cdot 10^{-3}$
Скорость звука $v_{\text{за}}$	$\frac{v_{\text{за}}^2 n_a \phi}{2\pi\lambda f_{H \max} f_H} = 3,6 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\phi}{2\pi f_H} = 2,5 \cdot 10^{-7}$	10^{-3}	$4 \cdot 10^{-3}$
Длина волны λ	$\frac{v_{\text{за}}^2 n_a \phi}{2\pi\lambda f_{H \max} f_B \lambda^2} = 2 \cdot 10^{-4}$	—	$2.4 \cdot 10^{-6}$	—
Низкая частота f_H	$\frac{v_{\text{за}}^2 n_a \phi}{2\pi\lambda f_{H \max} f_B \lambda^2} = 2 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\phi v_{\text{за}}}{2\pi f_H} = 2,5 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	10^{-4}
Высокая частота f_a	$\frac{v_{\text{за}}^2 n_a \phi}{2\pi\lambda f_{H \max} f_u^2} = 2,6 \cdot 10^{-12}$	—	$1.3 \cdot 10^{-7}$	—
Показатель преломления n_a	$\frac{v_{\text{за}}^2 \phi}{2\pi\lambda f_{H \max} f_B} = 0,7$	—	$10^{-5} - 10^{-7}$	—

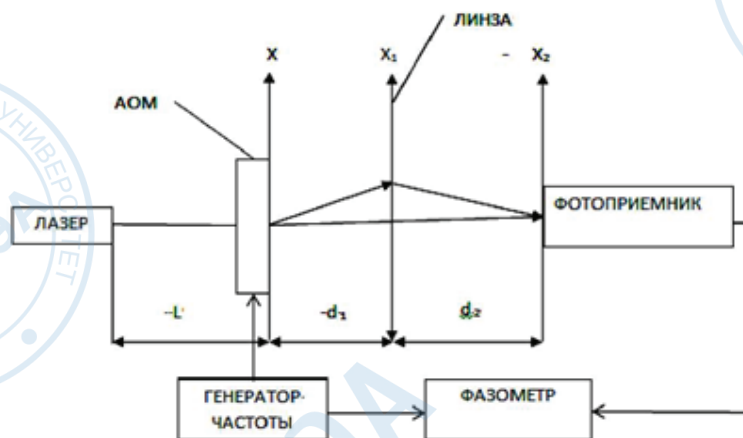


Рис. 2. Схема одноканального измерителя перемещений.

(13), получим следующее выражение для сигнала на выходе фотоприемника [12]:

$$\begin{aligned}
 U = A^2 l_{\text{ув}} S \int_{x_2 - \frac{l_{\text{ув}}}{2}}^{x_2 + \frac{l_{\text{ув}}}{2}} \frac{i}{\lambda^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp i \left[(\omega_c + \omega_a) t + 2 \frac{\pi x}{\Lambda} \right] \exp \left(\frac{ikx_1^2}{2L} \right) \exp \left(\frac{ik(x-x_1)^2}{2d_1} \right) * \\
 \exp \left(\frac{-ikx_1^2}{2f} \right) \exp \left(\frac{ik(x_1-x_2)^2}{2d_2} \right) + \exp(i\omega_c t) \exp \left(\frac{ikx^2}{2L} \right) \exp \left(\frac{-ik(x-x_1)^2}{2d_1} \right) * \\
 \exp \left(\frac{-ikx_1^2}{2f} \right) \exp \left(\frac{ik(x_1-x_2)^2}{2d_2} \right) dx dx_1 \Big|_{x_2}^2 dx_2 \approx U_m \sin c \left(\frac{\pi C_{\text{ув}}}{\Lambda \beta} \right) \cos \left(\omega_a t + \frac{2\pi x_2}{\Lambda \beta} \right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

где $U_m = 2 \cdot A^2 d^2 l_{uz} \times l_{uz} y S_\phi / K^2 L^2 \lambda^4$ – амплитуда сигнала;

$\Lambda_{\text{и}} = \Lambda_\beta$ – период интерференционной картины;

$\phi = 2\pi x_2 / \Lambda_\beta$ – фаза сигнала.

Определим, какими параметрами должна обладать линза, и какой диапазон изменения можно обеспечить в данной системе. Считая углы расходимости пучка лазера и дифракции света первого порядка на АОМ малыми, можно получить следующее выражение для диаметра линзы из геометрических построений на рис. 2.

$$D_{\text{л}} \geq d_1(\theta_1 + 2\theta) + 2\theta L. \quad (15)$$

здесь θ – расходимость пучка лазера;

θ_1 – угол дифракции света между пучками первого и нулевого порядков.

Рассчитаем основные параметры системы. Возьмем гелий-неоновый лазер с расходимостью $2 \cdot 10^{-3}$ и длиной волны 0.63 мкм. В качестве материала АОМ выберем парателлурит с $v = 617$ м/с и $f_B = 30 \cdot 10^6$ Гц. Тогда угол дифракции света первого порядка $\Theta_1 = \lambda/v$, $f'_B = 0,03$ рад. Положим $L=1$ м. Поскольку по условию $d_1 \ll L$, примем $d_1 = 100$ мм. Подставляя указанные числа в (3) получим $D_{\text{л}} \approx 7$ мм. Выбирая относительное отверстие порядка 1/3, получим фокусное расстояние линзы 21 мм. Используя (13), с учетом (14) получим следующее выражение для минимального периода интерференционной картины:

$$\Lambda_{\text{и мин}} = \Lambda_{\beta \text{ мин}} = \Lambda \cdot f' / (f' - d_1) = 5 \text{ мкм.}$$

По мере уменьшения расстояния между АОМ и линзой будет расти, а его максимальное значение зависит только от длины отрезка d_2 , величину которого, исходя из конструктивных соображений, примем равным 200 мм. Тогда выражение для максимального периода интерференционной картины примет вид:

$$\Lambda_{\text{и макс}} = \Lambda_{\beta \text{ макс}} = \Lambda \cdot (d_2 - f') / f' = 183 \text{ мкм.}$$

Диапазон измерения составит: $\Lambda_{\text{д}} = \Lambda_{\text{и макс}} - \Lambda_{\text{и мин}} = 178$ мкм.

Оценим точность измерения перемещений, считая погрешности параметров случайными величинами. Для этого выразим величину перемещения x_2 из формулы для фазы сигнала и найдем среднеквадратичную ошибку, используя метод дифференцирования передаточной функции по параметрам устройства [12].

$$\Delta x_2 = \sqrt{\left(\frac{v\beta\phi}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta\phi}{\phi}\right)^2 + \left(\frac{\phi\beta v}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\phi v\beta}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta f_B}{f_B}\right)^2 + \left(\frac{\phi v\beta}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2} \quad (16)$$

Используя полученные в работе [4] данные для относительных погрешностей, имеем: $\Delta\phi / \phi = 2.7 \cdot 10^{-3}$, $v/v = 8 \cdot 10^{-5}$, $f'/f = 10^{-4}$.

Погрешность $\Delta\beta / \beta$ зависит от термооптического коэффициента и перепада температур окружающей среды. Для кварцевого стекла этот коэффициент равен $2,13 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$ [5]. Полагая $t = 40^\circ\text{C}$, получим $\Delta\beta / \beta = 8.52 \cdot 10^{-4}$. Рассчитаем по выражению (16) максимальную ошибку при $\beta = \beta_{\text{макс}}$ и минимальную ошибку при $\beta = \beta_{\text{мин}}$ считая в обоих случаях фазу сигнала максимальной и равной 2.

Тогда получим: $\Delta x_{\text{макс}} = 0.5$ мкм, $\Delta x_{\text{мин}} = 0.014$ мкм. Класс точности равен $K = \Delta x_{\text{макс}} / \Lambda_{\text{д}} \cdot 100\% = 0.28\%$.

Сравнивая максимальную погрешность с погрешностью, полученной в предыдущем случае, можно заключить, что точность измерений существенно повысилась. Недостатком этого устройства является достаточно узкий диапазон измерения. Совместить высокую точность измерения и обеспечить широкий диапазон измерения позволяет рассмотренный ниже метод.

Особенность метода состоит в том, что формирование интерференционной картины осу-

ществляется с помощью трех пучков: пучка нулевого порядка и двух дифрагированных пучков. Это позволяет создать два канала измерения.

Схема устройства, реализующего предлагаемый метод, приведена на рис. 3.

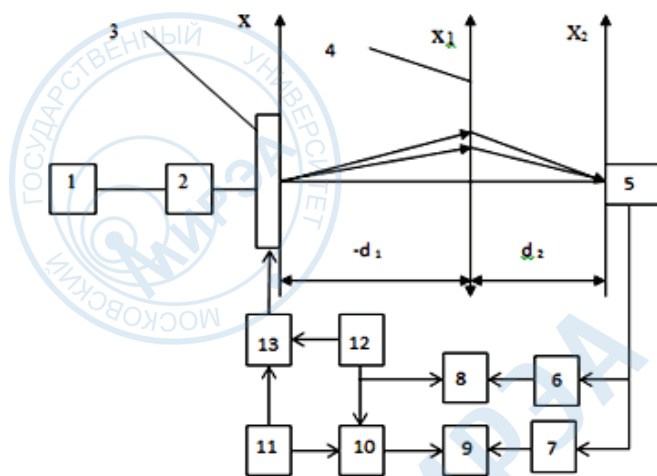


Рис. 3. Схема двухканального измерителя перемещений.

На рис. 3 показаны только центральные лучи пучков. Устройство содержит лазер 1, коллиматор 2, акустооптический модулятор (АОМ) 3, линзу 4, фотоприемник 5, фильтры 6 и 7, фазометры 8 и 9, фазовый детектор 10, генераторы частот 11 и 12, сумматор 13. Устройство работает следующим образом. Лазер 1 с помощью коллиматора 2 освещает АОМ 3 плоским волновым фронтом.

На АОМ от генераторов 11 и 12 через сумматор 13 подаются два гармонических сигнала с близко расположенными частотами f_B и $f_B + f_H$. В результате в АОМ 3 возникают две дифракционные решетки, на которых свет дифрагирует. Линза 4 собирает пучки в плоскости X_2 , где они интерферируют между собой и с пучком нулевого порядка. Напряжения с выхода фотоприемника 5 поступают на фильтры 6 и 7, которые выделяют сигналы с частотами f_B и f_H , соответственно. Напряжения с генераторов 11 и 12 подаются на фазовый детектор 10, который выделяет сигнал с частотой f_H .

Напряжения с фазового детектора 10 и фильтра 7 поступают на фазометр 9, который измеряет фазу сигнала в грубом канале измерения. Напряжения с генератора 12 и фильтра 6 с частотами f_B поступают на фазометр 8, который измеряет фазу сигнала в точном канале измерения.

Оценим параметры устройства, учитывая, что фотоприемник 5 располагается в плоскости изображения, положение которой определяется формулой (13). Используя преобразование Френеля с учетом (13), получим следующее выражение для сигналов на выходе фотоприемника 5:

$$\begin{aligned}
 U = A^2 C_{ув} S \int_{x_2 - \frac{C_{шх2}}{2}}^{x_2 + \frac{C_{шх2}}{2}} \left| \frac{i}{\lambda^2} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp i[(\omega_c + \omega_B)t + \frac{2\pi}{\Lambda_1} x] \exp ik \frac{(x - x_1)^2}{2d_1} \exp - \frac{ikx_1^2}{2f} \exp ik \frac{(x_1 - x_2)^2}{2d_2} + \right. \right. \\
 \left. \exp i[(\omega_c + \omega_B + \omega_H)t + \frac{2\pi}{\Lambda_2} x] \exp ik \frac{(x - x_1)^2}{2d_1} \exp \frac{ikx_1^2}{2f} - \exp ik \frac{(x_1 - x_2)^2}{2d_2} + \exp i\omega_c t \exp ik \frac{(x - x_1)^2}{2d_1} \exp - \frac{ikx_1^2}{2f} \exp ik \frac{(x_1 - x_2)^2}{2d_2} \right\} dx dx_1 \Big|^2 dx_2 \approx U \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi C_{шх2}}{\beta \Lambda_1} \right) \cos (\omega_B t + \frac{2\pi x_2}{\beta \Lambda_1}) + \\
 + U \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi C_{шх2}}{\beta \Lambda_2} \right) \cos [(\omega_B + \omega_H) t + \frac{2\pi x_2}{\beta \Lambda_2}] + U \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi C_{шх2}}{\beta \Lambda_H} \right) \cos (\omega_H t + \frac{2\pi x_2}{\beta \Lambda_H})
 \end{aligned} \quad (17)$$

здесь $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

$U = 2 A^2 d^2 I C_{\text{ух}2} C_{\text{уу}} S / k^2 L^2 \lambda^2$ – амплитуда сигнала;

A – амплитуда волны света ;

$\omega_c = 2\pi f_c$ – круговая частота световой волны;

f_B и $f_B + f_H$ – частоты возбуждения АОМ;

S – чувствительность фотоприемника;

β – линейное увеличение;

$$\Lambda_{И1} = \beta \Lambda_1 = \beta \frac{V_{3B}}{f_B} ; \quad \Lambda_{И2} = \beta \Lambda_2 = \beta \frac{V_{3B}}{f_B + f_H} ; \quad \Lambda_{ИH} = \beta \Lambda_H = \beta \frac{V_{3B}}{f_H} \quad \text{– периоды интер-}$$

ферирующих пучков;

V_{3B} – скорость звука в АОМ;

$C_{\text{ух}}$ и $C_{\text{уу}}$ – размеры щели на фотоприемнике по координатам X и Y .

Для точного канала используется сигнал с частотой f_B и фазой $\phi_T = \frac{2\pi x_2 f_B}{\beta V_{3B}}$, а для грубого канала – сигнал с частотой f_H и фазой $\phi_T = \frac{2\pi x_2 f_H}{\beta V_{3B}}$.

Оценим, какими параметрами может обладать устройство и какой диапазон и точность измерений оно обеспечивает. Для выбора соотношений между частотами f_B и f_H разделим фазы сигналов друг на друга.

$$\frac{\phi_T}{\phi_T} = \frac{f_B}{f_H}. \quad (18)$$

Обеспечение работы двух каналов состоит в том, что при достижении в точном канале максимального значения фазы, то есть 360° , фаза в грубом канале меняется на величину разрешающей способности фазометра $\Delta\phi_T = 1^\circ$ [1]. Подставляя указанные выше значения фаз в (18), получим $f_H = \frac{f_B}{360}$. Определим параметры линзы. Учитывая, что углы дифракции света

на выходе АОМ малы, получим следующее выражение для диаметра линзы

$$D_{\text{л}} = 2D_{\text{п}} + \theta d_1. \quad (19)$$

здесь $D_{\text{л}}$ – диаметр пучка на выходе АОМ,

$\theta = \frac{\lambda(f_B + f_H)}{V_{3B}}$ – максимальный угол между дифрагированными пучками первого и нуле-

вого порядков.

В качестве материала АОМ выберем парателлурит с $V_{3B} = 617$ м/с и $f_B = 30 \cdot 10^6$ Гц. Диаметр пучка, освещающего АОМ, выберем из условия: $D_{\text{п}} = \Lambda_H = \frac{V_{3B} 360}{f_H} = 7,4$ мм. Выбирая из кон-

структивных соображений $d_1 = 100$ мм, из (19) получим $D_{\text{л}} = 10$ мм.

При относительном отверстии линзы $1/3$ фокусное расстояние составит 30 мм. Учитывая (13) и (17), получим следующие выражения для минимальных периодов для точного и грубого каналов измерения:

$$\Lambda_{\text{МИНТ}} = \Lambda_{И1} \beta_{\text{МИН}} = \Lambda_{И1} f' / (f' - d_1) = 9 \text{ мкм.}$$

$$\Lambda_{\text{МИНГ}} = \Lambda_{ИH} \beta_{\text{МИН}} = \Lambda_{ИH} f' / (f' - d_1) = 3 \text{ мм.}$$

Максимальное линейное увеличение определяется отрезком d_2 , величину которого из конструктивных соображений примем равной 200 мм. Тогда выражения для максимальных периодов по точному и грубому каналам будет иметь вид: $\Lambda_{МАКСТ} = \Lambda_{И1} \beta_{МАКС} = \Lambda_{И1} (d_2 - f) / f = 116$ мкм.

$$\Lambda_{МАКСГ} = \Lambda_{ИИ} \beta_{МАКС} = \Lambda_{ИИ} (d_2 - f) / f = 42 \text{ мм.}$$

Определим диапазон измерения по точному и грубому каналам.

$$\Lambda_{ДТ} = \Lambda_{МАКСТ} - \Lambda_{МИНТ} = 107 \text{ мкм.}$$

$$\Lambda_{ДГ} = \Lambda_{МАКСГ} - \Lambda_{МИНГ} = 39 \text{ мм.}$$

Оценим точность измерений для точного канала, считая погрешности параметров случайными. Выражая x_2 из формулы для фазы сигнала, найдем среднеквадратическую ошибку, используя метод дифференцирования передаточной функции по параметрам системы:

$$\Delta x_2 = \sqrt{\left(\frac{V_{3B} \beta \phi}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta \phi}{\phi}\right)^2 + \left(\frac{\phi \beta V_{3B}}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta V_{3B}}{V_{3B}}\right)^2 + \left(\frac{\phi V_{3B} \beta}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta f_B}{f_B}\right)^2 + \left(\frac{\phi V_{3B} \beta}{2\pi f_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right)^2} \quad (20)$$

Данные для относительных погрешностей возьмем из работы [4]:

$$\frac{\Delta \phi}{\phi} = 2.7 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{\Delta V_{3B}}{V_{3B}} = 8 \cdot 10^{-5}, \quad \frac{\Delta f_B}{f_B} = 10^{-4}.$$

$$\text{Погрешность } \frac{\Delta \beta}{\beta} = G \Delta t,$$

здесь G – термооптический коэффициент,

Δt – перепад температур.

Для кварцевого стекла $G = 2.13 \cdot 10^{-4}$ град⁻¹ [5], для получим $\frac{\Delta \beta}{\beta} = 8,52 \cdot 10^{-4}$. Рассчитаем

по выражению (20) максимальную ошибку при и минимальную ошибку при $\beta = \beta_{МАКС}$, считая в обоих случаях фазу сигнала максимальной и равной 2π . Тогда из (20) получим $\Delta x_{МАКС} = 0,35$ мкм, $\Delta x_{МИН} = 0,026$ мкм. Класс точности $K = (\Delta x_{МАКС} / \Lambda_{ДТ}) \cdot 100 \% = 0,32\%$.

Таким образом, двухканальный измеритель перемещений обладает бóльшим диапазоном измерений, чем одноканальный, при сохранении высокой точности.

Заключение

Предложен гетеродинный метод измерения перемещений, основанный на создании интерференционной картины с помощью дифрагированных на акустооптическом модуляторе пучков, что позволяет изменять ее период посредством перестройки частоты генератора. Это дает возможность производить абсолютные измерения перемещений объекта более простым методом по сравнению с известными устройствами. В развитие предложенного метода разработаны схема измерения продольных и поперечных перемещений, одноканальная схема измерения поперечных перемещений повышенной точности, двухканальная схема измерения поперечных перемещений с расширенным диапазоном измерений и высокой точности. Рассчитаны диапазон измерений и ошибки предложенных устройств.

Литература:

1. Ларкин А.И., Юу Ф.Т.С. Когерентная оптика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 316 с.
2. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.

3. Евсеев И.В., Рубцова Н.Н., Самарцев В.В. Когерентные переходные процессы в оптике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 536 с.
4. Магурин В.Г., Тарлыков В. А. Когерентная оптика: учебное пособие по курсу «Когерентная и нелинейная оптика». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 122 с.
5. Титов А.А., Амурский В.Б., Гарипов В.К. Методы построения и расчета лазерных измерительных и запоминающих устройств. М.: Машиностроение, 2008. С. 7–23.
6. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения: пер. с англ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 512 с.
7. Гришин С.Г. Оценка фазовой погрешности в гетеродинных лазерных интерференционных измерительных системах // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 11–13.
8. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н. Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.
9. Cosijns S.J.A.G. Displacement laser interferometry with sub-nanometer uncertainty. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. 189 p.
10. Leach R. Fundamental Principles of Engineering Nanometrology. Elsevier Inc., 2010. 352 p.
11. Разумовский И.А.. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 240 с
12. Нагибина И.М., Москалев В.А., Н.А. Полушкина, В.Л. Рудин. Прикладная физическая оптика. М.: Высшая школа, 2002. 568 с.

УДК: 338.242

СЕТЕВАЯ ЭКОНОМИКА КАК ФЕНОМЕН ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЩЕСТВА

Т.Ю. Гавриленко¹, к. экон. н., заведующий кафедрой
И.П. Проворова², к.техн.н., заместитель директора

¹Кафедра бизнес-технологий и управления

²Институт инновационных технологий и государственного управления
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: gavrilenko@mirea.ru

На основе ретроспективного анализа использования сетевых форм организации экономики выявлены их наиболее существенные достоинства и недостатки. Определено место основных принципов в организационно-экономическом и техническом аспектах с точки зрения их реализации в формате сетевой экономики. Отмечена особая роль информационных технологий и освоения интернет-технологий в становлении современного информационного общества. В настоящей работе авторы уделяют внимание некоторым аспектам становления сетевой культуры.

Ключевые слова: сетевая экономика, управление, сети, сетевые формы, архитектура управления, сетевая культура, информационные технологии, информационное общество.

NETWORK ECONOMY AS PHENOMENON OF INFORMATION SOCIETY

T.Yu. Gavrilenko,
I.P. Provorova

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: gavrilenko@mirea.ru

In the paper the most basic advantages and drawbacks when using network forms of economy organization based on the retrospective analysis have been revealed. The place of the main principles in organizational, economic and technical aspects from their realization point of view in the network economy format has been defined. The key role of information technologies as well as mastering Internet technologies in modern information society development have been highlighted. The authors also pay attention to some aspects of network culture evolution.

Keywords: network economy, management, networks, network forms, architecture of management, network culture, information technologies, information society.

Предметом рассмотрения в настоящей статье являются сетевые формы организации экономики и их место в современном информационном обществе.

В течение прошедших двух десятилетий в отечественной и мировой экономике, в наиболее передовых в техническом и технологическом плане сферах экономики, в области организационных и управленческих конструкций бизнес-единиц и бизнес-систем происходили серьезные

процессы трансформации. Они позволяют сделать вывод, что современная экономическая система все больше приобретает очертания сетевой экономики, т.е. получают всестороннее и углубленное развитие сетевые формы организации экономики хозяйственных систем.

Известно, что сетевые формы организации экономической деятельности в той ли иной мере существовали почти во все периоды хозяйственной жизни. Безусловно, в каждом из определенных периодов времени и стадий развития они имели различные характеристики: состав, структуру, целевые установки, конкретные конфигурации и пр. Строго говоря, сети имеют очень давнюю историю. Так, например, известный немецкий социолог Норберт Элиас утверждал, что в феодальном обществе уже существовали сети, которые были основаны на принципах сословного общества [1].

Качественный скачок произошел в относительно недавнем прошлом, точнее, в конце прошлого века, когда увеличение объемов и размеров сетевых форм организации экономики, связанное с невиданным до этого масштабом и интенсивностью процессов накопления и обмена информацией и их глобализацией, развитием информационных технологий, привело к формированию всемирной электронной среды. Актуальность исследования вопросов, связанных с проблематикой формирования, развития, трансформации, диффузии сетей, в частности, обусловлена уровнем распространения сети Интернет по миру в целом и по отдельным странам. В 2015 г. 46,4% жителей планеты Земля пользовались Интернетом. При этом рост числа пользователей с 2000 г. по 2015 г. достиг 832,5%. 90,6% жителей Японии, 87,4% жителей США, 88,4% жителей Германии – это пользователи сети Интернет. Россия в самом верху списка стран, жители которых активно используют сеть – 70,5% населения. Однако действительно поразительными представляются следующие данные. В Нигерии число пользователей сети Интернет в 2015 г. достигло 50,5% населения. Цифра вроде не столь значительна, но при этом рост числа пользователей сети за последние 15 лет достиг 46250%. В 2000 г. пользователей сети Интернет в этой стране было всего 200 тыс. человек при общей численности населения более 180 млн. человек, а в 2015 г. таковых стало почти 93 млн. человек. Нигерия занимает 7-е место в мире по числу населяющих ее жителей и является одной из наиболее бурно развивающихся экономик континента [2].

В работах одного из крупнейших современных социологов профессора М. Кастельса, ведущего специалиста в области исследований информационного общества, проведен обширный анализ тех процессов и тенденций, которые привели к формированию своеобразного облика современного общества, которое автор назвал «сетевым». Профессор Кастельс опирался на выдвинутый им постулат о том, что информация представляет особый по своей природе ресурс, который может легко проникать сквозь различные границы и преодолевать разные преграды. Он рассматривал наступившую информационную эру как эпоху глобализации, воплощением, и, одновременно, одним из основных средств которой являются сетевые структуры. Известный ученый считал их, пожалуй, более всего характерными для современного мира. М. Кастельс пишет: «Исследование зарождающихся социальных структур позволяет сделать следующее заключение: в условиях информационной эры историческая тенденция приводит к тому, что доминирующие функции и процессы все больше оказываются организованными по принципу сетей. Именно сети составляют новую социальную морфологию наших обществ, а распространение «сетевой» логики в значительной мере сказывается на ходе и результатах процессов, связанных с производством, повседневной жизнью, культурой и властью... Да, сетевая форма социальной организации существовала и в иное время, и в иных местах, однако парадигма новой информационной технологии обеспечивает материальную основу для всестороннего проникновения такой формы в структуру общества» [3].

В силу того, что конкретные проявления сетей можно наблюдать и в биологии, и в социологии, и в экономике, в современной научной литературе нет единого мнения теоретиков и практиков о том, как определять понятие «сети». В общем виде сеть – это набор связанных между собой элементов, которые – в зависимости от их характера и выстраиваемых отношений – получают как реальные технические, промышленно-экономические и социальные

сети, а также в виде моделей, отображающих такого рода структуры и процессы. По авторитетному мнению М. Кастельса, «сети представляют собой открытые структуры, которые могут неограниченно расширяться путем включения новых узлов, если те способны к коммуникации в рамках данной сети, то есть используют аналогичные коммуникационные коды (например, ценности или производственные задачи)» [3]. Приведем и одно из наиболее современных, достаточно пространных, но при этом полных и всесторонних определений того, что есть «сеть», которое дано авторами исследования «Сетевые методы в государственном управлении» Л.В. Савиным, С.Н. Федорченко и О.К. Шварцем: «Смысл «сети», «сетевое принятие» состоит в том, что главным элементом всей модели является «обмен информацией» с максимальным расширением форм производства этой информации, доступа к ней, ее распределения, обратной связи. «Сеть», в широком понимании, представляет собой новое информационное пространство, в котором разворачиваются основные стратегические процессы, а также их медийное, дипломатическое, экономическое и техническое обеспечение. «Сеть» в таком широком понимании включает в себя одновременно различные составляющие, которые ранее рассматривались строго отдельно – все это отныне видится как взаимосвязанные элементы единой «сети», между которыми должен осуществляться постоянный информационный обмен» [4].

Те же авторы в своей монографии рассмотрели и основные теории, описывающие сетевые структуры и характер их деятельности, среди них такие, как: теория графов, теория равного производства, теория сетевых акторов, теории силы слабых связей (ССС) Грановеттера и теории структурных дыр Берта, дескриптивная теория сетей и др. Если касаться вопроса истории возникновения и развития сетей, то этот вопрос достаточно широко освещен в работе А.И. Мозгового [5].

В целом изучение экономической природы сети как одного из механизмов координации действий экономических агентов, имеющих свои особенности, отличающие его от других механизмов координации, восходит к работам О. Уильямсона и развито его последователями в рамках новой институциональной экономической теории (НИЭТ). В рамках неонституционализма развивалась также и теория транзакционных издержек, опирающаяся на идеи Р. Коуза, изложенные в работе «Природа фирмы». Согласно Р. Коузу, существование фирм должно основываться на минимизации издержек, что, соответственно, становится стимулом к формированию экономических сетей, тем самым обеспечивая возможность уменьшения транзакционных издержек [6].

Многие отечественные авторы (С. Авдашева, М. Бек, Н. Бек, С. Гуриев, В. Дементьев, Т. Долгопято, В. Катькало, Р. Качалов, Г. Клейнер, С. Куш, Я.И. Кузьминов, Б. Мильнер, Ю. Попова, Н. Попов, В. Радаев, В. Ребязина, А. Стерлигова, М. Смирнова, В. Третьяк, О.Третьяк, Я. Паппэ, М. Шерешева, О. Юлдашева, А. Яковлев и др.) затрагивают в своих трудах вопросы проблематики формирования и функционирования различных межфирменных связей между хозяйственными субъектами российской экономики. Так, российский исследователь С. И. Паринов на основе статической модели социогаммы Джейкоба Леви Морено, основателя Института социометрии и психодрамы (Института Морено), разработал сетевую модель взаимодействия между экономическими агентами [7]. Стоит заметить, что имеющаяся мозаичность теоретической и концептуальной базы обуславливает размытость границ данной области исследований и настоятельно требует научного осмысления, и многие аспекты проблематики продолжают оставаться дискуссионными.

В настоящее время в России исследования сетевых форм организации бизнеса активно ведутся, в первую очередь, в Национальном исследовательском университете «Высшая школа экономики», в Высшей школе менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета, на экономическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова.

Сформированная постиндустриальная фаза развития промышленной цивилизации определяется понятием «информационное общество», характеризующееся всесторонней информатизацией деятельности всех социально-экономических структур и являющейся основой для

формирования и развития сетевой экономики («*networked economy*»), которая сегодня имеет глобальный характер. В докладе, подготовленном Европейской Комиссией, глобальная сетевая экономика определяется как «среда, в которой любая компания или индивид, находящиеся в любой точке экономической системы, могут контактировать легко и с минимальными затратами с любой другой компанией или индивидом по поводу совместной работы для торговли, для обмена идеями и *ноу-хау* или просто для удовольствия» [8].

Прежде, чем обрести современное и рельефно выраженное значение, сетевая экономика активно проявилась фрагментарно в организации больших комплексов работ, выходящих за пределы сложившихся производственных структур, и опиралась на программно-целевые методы, представляющие собой взаимосвязанную систему построения дерева целей, структуризацию работ и моделирование. Их применение вызвано ситуацией, когда задача не решается в рамках одной или нескольких традиционных структур и становится возможной только путем привлечения к работе большого количества разносторонних исполнителей, которые объединяются для осуществления таких целей, как, например, разработка ядерной или космической программы, военно-технических систем. Далее эти методы стали широко применяться и в других сферах.

Одним из эффективных инструментов реализации подобных программ стали сетевые методы планирования и управления, базирующиеся на использовании вычислительных систем. В этих случаях целью процесса организации являлась разработка заранее определенной структуры распределения ролей для эффективного осуществления проекта, включая создание коммуникационных центров принятия решений, которые обеспечивают координацию индивидуальных усилий для достижения групповых целей.

В процессе организации работы в сетях, так же, как и во всяком другом управленческом процессе, не существует универсального метода и проявляется много специфических особенностей. Следует, однако, констатировать, что при разработке методов организации работ и управления наиболее существенными отрицательными проявлениями обычно бывают следующие:

- неумение четко определить взаимосвязи, а также границы, обеспечивающие оптимальную децентрализацию деятельности;
- нежелание делегировать полномочия;
- предоставление полномочий без ответственности и возложение ответственности без полномочий.

В этой связи отметим и существенные преимущества системы сетевого планирования, которая заставляет руководителей непосредственно заниматься планированием работ; вынуждает продумывать осуществление проекта от начала и до конца, и каждый нижестоящий руководитель должен четко определять всю совокупность обстоятельств на участке вверенных ему работ; концентрирует внимание на критических составляющих, по которым принимаются специальные решения. Кроме того, сетевая форма позволяет осуществлять опережающий контроль; в реальном масштабе времени составлять аналитические отчеты и, таким образом, своевременно интенсифицировать работу в критических точках и на определенных уровнях организационной структуры, то есть обеспечивать положительные обратные связи. Таким образом, новое содержание целей и трудности их реализации в рамках традиционных структур явились стимулом к созданию методов и средств их осуществления, в частности, таких, как сетевая организация работ, вычислительные и информационные системы, экономикоматематические методы и т.п.

Последующие события развивались в таком направлении, когда уже большая совокупность новых методов и средств стимулировала иные формы организации работ, то есть новые структуры проявлялись уже как следствие разработки новых методов и средств. Так, создание персональных компьютеров и техническая реализация на их базе компьютерных сетей, в свою очередь, определили новую форму сетевой организации работ, не связанную со сложившейся традиционной системой, определяемой территорией, временем и режимом работы, иерархией

подчиненности, транспортными коммуникациями и т.п.

В процессе динамичного развития науки и производства в рамках сложившейся системы управления внедряются различные методы, обеспечивающие решение новых задач. Это, прежде всего, экономико-математические методы. Широко используется программно-целевое планирование, которое реализуется вне жесткой структуры организации работ. Указанные методы представляют собой организацию работ по цели, когда структурные единицы предприятий своими составными частями принимают активное участие за пределами собственных целевых задач.

Отметим, что по мере широкого внедрения информационных технологий вся организационная структура, технология производства работ и управления формализуется и, далее, отражается в прикладном программном обеспечении, создавая невиданную ранее информационную базу для анализа [9].

Информационные технологии в динамично развивающейся экономической системе позволили принципиально по-иному строить теоретические исследования в сфере экономики и управления, опираясь преимущественно на высококлассных специалистов, работающих в различных научных и производственных структурах и получивших возможность выполнять квалифицированную работу или осуществлять консультации по важнейшим проблемам, которые решаются в рамках сетевых структур.

Обобщая некоторый опыт, отметим системную обстановку, характеризующуюся тем, что весь прошедший век был насыщен событиями, которые развивались, в том числе, в двух плоскостях:

первая – кардинальные социально-экономические преобразования, которые проявлялись в поисках эффективной системы управления в обществе в целом: совершенствование рыночной системы путем ее социальной ориентации, поиск наиболее эффективных экономических решений и др.;

вторая – научно-техническая революция, которая определила необходимость поиска и создания адекватных методов управления при решении беспрецедентно крупных и сложных проектов: массовое использование программно-технических средств, экономико-математических методов, поиск и реализация новых структур организации и управления научными исследованиями и разработками, внедрение информационных технологий и т.п.

Особо необходимо заметить, что при решении социально-экономических задач, связанных с повышением эффективности производства, общество опирается на два основных фактора – на ресурсы, с одной стороны, и на методы их использования, другой. Причем из истории развития отдельных стран видно, что, опираясь на методы, можно формировать для себя и недостающие ресурсы. Более того, многие из промышленно развитых стран, не имея природных ресурсов, но используя методы и квалификацию исполнителей, также обеспечивают высокий уровень своего развития. Анализируя сложившуюся к началу нового столетия ситуацию в социально-экономической жизни, которая все более приобретает очертания сетевой экономики, необходимо выделить следующие характерные для неё черты:

- динамичное развитие науки и новой техники и технологий;
- их органическое и принудительное отражение в моделях в форме сетей как неизбежного продукта, сопровождающего использование информационных технологий;
- совершенствование методов развития науки и технологий, когда вместо дорогостоящих натуральных экспериментов используются модели и сети, созданные в рамках программно-технических средств.

Отсюда сетевые принципы в организационно-экономическом и технологическом аспектах могут рассматриваться, как:

- один из действенных методов организации работ в традиционных научных и промышленных системах;
- способ концентрации ресурсов на приоритетном направлении, не нарушающий сложившихся организационных структур;

- инструментарий при выработке механизмов совершенствования управления, способствующий стандартизации и унификации процессов;
- базовый способ повышения экономической эффективности в различных сферах деятельности;
- метод организации работ, обеспечивающий концентрацию усилий в динамичных процессах научно-технического прогресса.

Рассматриваемые методы и средства в разной форме и масштабах уже сравнительно давно и широко используются. В нашей стране в условиях кризиса эти методы и средства, к сожалению, не стоят в ряду приоритетных задач. Однако таковыми они должны стать в новых условиях, когда государством, субъектом реформ, принимаются меры по возрождению индустриальной мощи страны на основе интенсификации научной и производственной деятельности. Можно констатировать, что такие работы разрозненно проводятся, но, к сожалению, в силу многих причин они пока не приобрели системности, массовости, и все это следует организовать в условиях последующих стадий реализации преобразований.

Отметим, что изложение данного материала базируется на определенном опыте работы, представленном следующей направленностью:

- разработка и внедрение программно-технических средств в технологические процессы научных и производственных систем;
- разработка и использование программно-технических, коммуникационных средств в системах управления, обеспечивающих широкий спектр выполнения государственных функций;
- создание программного обеспечения для модернизации программно-технической базы информационных технологий в различных сферах отечественной науки, производства и образования.

Все структуры, использующие сетевые принципы организации работ в указанных направлениях, опираются на большие квалифицированные коллективы. Естественно, что используемые методы и средства организации работ и управления дифференцируются в зависимости от цели, масштабов работ, необходимых исходных ресурсов, требований к технологиям и уровню подготовки специалистов. Вполне очевидно, что научные исследования в атомной энергетике, в космонавтике требуют принципиально иной организации и управления, нежели исследования в таких науках, как экономика, юриспруденция, философия и ряд других. Общее в них проявляется в том, что обе сферы исследований должны опираться, прежде всего, на специалистов высшей квалификации, на результаты деятельности научных школ. В то же время есть и принципиальная разница в достижении целей в этих двух сферах. Так, во второй сфере деятельности не требуется большого объема материальных ресурсов, а необходима организация участия как отдельных специалистов, так и научных школ в проблемах, наиболее важных для современного этапа развития российского общества, а именно: экономическая теория, хозяйственный механизм, предпринимательское право, проблемы управления. Именно сетевые методы организации работ способствуют активизации деятельности при решении такого рода задач, и необходимо приложить максимум усилий в этих целях. Обратим внимание на то, что рассматриваемая проблема не может быть автоматически решена сама по себе. Она вписывается в общую систему совершенствования хозяйственного механизма, когда конкурентная среда определяет мотивацию к интенсификации процессов и, таким образом, поиск методов их обеспечения. Чем ограниченнее объем факторов производства, тем большую роль при достижении целей играет управление.

Фиксация факта существования и дальнейшего развития глобальной сетевой экономики происходит при наличии ряда процессов, среди которых, в первую очередь, выступает развитие и распространение Интернет-сети и, соответственно, Интернет-технологий, характеризующихся переносом в электронную среду различных видов социально-экономической деятельности. Заметным явлением последнего времени, свойственным сетевой экономике, становится

процесс превращения традиционных организационных структур в сетевые: так образуются и межфирменные кооперации, и финансово-промышленные группы, и различного рода международные, а, зачастую, и глобальные объединения.

Еще одним существенным процессом, характерным для сетевой экономики, является вытеснение традиционных иерархических и рыночных форм обслуживания экономических отношений в обществе. Брэдфорд Де Лонг, известный американский исследователь, научный сотрудник Национального бюро экономических исследований (*National Bureau of Economic Research*) и профессор Майкл Фрумкин, специалист по правовым проблемам в сфере Интернета, утверждают, что «современные технологии начинают подрывать свойства, которые делают Невидимую Руку рыночной системы эффективным и эффективным средством для организации производства и распределения продукции» [10]. Те же авторы указывали в своих работах и на экономические преимущества сетевых форм организации бизнеса, работ и управления.

Экономические формы сетевой экономики выстраиваются вокруг глобальных сетевых структур капитала, управления и информации, их формирование и развитие напрямую сопрягается с развитием информационных технологий.

С точки зрения сетевой экономики, именно информационные технологии, помимо прочего, приносят экономическую выгоду. В качестве простого примера можно указать на использование компаниями своих сайтов для организации потребительских обществ. Это особенно характерно для производства программного обеспечения, когда информационные технологии служат для объединения программистов и системных разработчиков, рассредоточенных практически по всему миру. Опираясь на сеть, разработчики компьютерных программ могут сотрудничать в области отладки операционных систем и программных приложений, предлагать свои идеи, а также обеспечивать пользователей ценными советами и новыми программными приложениями, расширяющими возможности различных вычислительных систем, то есть проводить работу по сопровождению программных продуктов.

Можно сказать, что сети – это упорядоченный процесс, базирующийся больше на правилах, так называемых протоколах, чем на авторитете власти. В определенном смысле сети представляют собой устойчивые обменные связи при отсутствии административно определенного властного органа. Связность и устойчивость сети поддерживают и возобновляют не столько команды и приказы, сколько правила поведения. Именно поэтому организации, базирующиеся на информационных системах и сетевых принципах, являются более мобильными, самоорганизующимися, самовозобновляющимися и самовоспроизводящимися, чем традиционные конструкции командных иерархий с жестко заданными целями, когда концепция сети совпадает с концепцией системы. Высказанное утверждение в известной мере позволяет констатировать, что, в принципе, любая организация представляет собой сеть, поскольку она соединяет (координирует) совокупность элементов (исполнителей).

Следует отметить, что в сфере организации и управления в настоящее время широко используется понятие «архитектура», которое, согласно определению, трактуется как строительное искусство, зодчество, в том числе, характеризующее стиль и художественный характер здания. Архитектура управления в современной широкой трактовке – это организационная структура системы, предполагающая разделение ее на части, установление связей между частями и механизмами взаимодействия, определяющая основные принципы проектирования и функционирования системы, имеющей свой стиль и характер. В такой же трактовке используются понятия «архитектура вычислительной системы», «архитектура компьютера», «архитектура программного обеспечения». Архитектура программного обеспечения, например, представляет собой общую логическую организацию программной системы, включающую разделение системы на модули, связи между ними, механизмы взаимодействия компонентов и принципы проектирования системы [11].

Архитектура как общего, так и прикладного программного обеспечения сама по себе является сетевой структурой и играет важную роль в процессах создания и совершенствования эффективных систем управления, поскольку, в особенности, прикладное программное обеспе-

чение отражает все процессы в форме их моделей, так как прикладные программы создаются именно на базе формализации и последующей алгоритмизации автоматизируемых процессов.

Остановимся еще на одном аспекте, связанном с проблематикой сетевой экономики, сетевых форм управления и организации работ, а именно на феномене складывания и существования особой специфической сетевой культуры. Рассматривая понятие культуры в ее системном значении и, в частности, культуру духовную, производственную, научно-техническую, политическую, правовую, предпринимательскую, профессиональную, культуру труда, можно говорить и о так называемой «сетевой» культуре. Ее исходным моментом сужит сформировавшееся в XX веке научное направление – синергетика. Оно исследует процессы самоорганизации в природных, социальных и когнитивных системах, то есть системах, связанных с проблемами познавательной деятельности. В настоящее время принципы, разработанные в рамках указанного научного направления, эффективно используются в управлении.

Сетевая культура в широком смысле – феномен культуры, характеризующийся особым типом внутренних и внешних структурно-функциональных взаимосвязей и взаимозависимостей. Сетевой культуре присущи следующие черты:

- развитие по принципам самоорганизации;
- сложные внутренние взаимодействия;
- децентрализация и расширение горизонтальных связей;
- ослабление иерархичности;
- ориентация на открытость информационно-коммуникационных связей.

Такого рода культура не появилась внезапно, как открытие. Она проявляется как интегрированный опыт, накопленный в управлении в особенности во второй половине прошедшего столетия. Сетевая культура начала активно реализовываться на базе такого инструментария, как информационные технологии. На формирование сетевой культуры сильное влияние оказали новые принципы информационно-коммуникативного взаимодействия, появление таких систем, как Интернет, и в целом становление информационного общества, основанного на принципах сетевой культуры, открытом для инноваций, отличающимся высокой динамичностью, не рискующим при этом потерей стабильности.

Сегодня признаки сетевой культуры проявляются практически на всех уровнях социально-экономической деятельности, начиная от выстраивания новой конфигурации организационно-управленческой деятельности (сетевая организация, сетевой менеджмент, сетевой маркетинг и т.д.) до включения сетевых принципов в различного рода социальные институты: разного рода надгосударственные некоммерческие организации, независимые медиасообщества, и формирование сетевых групп и сообществ. Принципы сетевой культуры широко внедряются в сферу образования, здравоохранения и культуры.

Особыми чертами обладает и сетевая культура в столь распространенных в настоящее время социальных сетях. Характерной спецификой социальных сетей, в которых взаимодействуют социальные субъекты, является отсутствие связей с деятельностью формальных структур. Исследование сетевой культуры, которая формируется в социальных сетях, требует отдельного рассмотрения, возможно, с привлечением инструментария многих наук, таких, например, как социология и психология.

Итак, в данной статье последовательно:

- приведены наиболее приемлемые для научного и практического применения определения ряда понятий: «сети», «сетевая экономика», «архитектура управления», «сетевая культура»;
- сделан ретроспективный анализ использования в отечественной экономике сетевых форм планирования и управления;
- выявлены существенные недостатки и достоинства сетевого метода организации работ и управления;
- определено место основных принципов в организационно-экономическом и техническом аспектах, с точки зрения их реализации в формате сетевой экономики;

- отмечена особая роль информационных технологий и освоения Интернет-технологий в становлении современного информационного общества;
- обрисованы характерные черты сетевой культуры.

Возможно, пока ещё не следует торопиться с широким использованием понятия «сетевое общество», но констатация того, что оно уже отражает многие процессы, происходящие сегодня в научной, производственной и социально-экономической деятельности, является бесспорным.

Литература:

1. Элиас Н. О процессе цивилизации: Социогенетические и психогенетические исследования: в 2-х т. М.-СПб.: Университетская книга, 2001. Т. 1. 332 с. Т. 2. 382 с.
2. <http://www.internetworldstats.com/top20.htm>.
3. Кастелс М. Становление общества сетевых структур // Новая постиндустриальная волна на Западе. Антология / под ред. В.Л. Иноземцева. М.: Academia, 1999. С. 494–505.
4. Савин Л.В., Федорченко С.Н., Шварц О.К. Сетецентрические методы в государственном управлении. М.: ООО «Сам полиграфист», 2015. 146 с.
5. Мозговой А.И. Виртуально-сетевая форма управления международным инновационным проектом // Институт государственного управления, права и инновационных технологий (ИГУПИТ). Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2012. № 1 (10). 11 с.
6. Коуз Р. Природа фирмы / В кн.: Коуз Р. Фирма, рынок и право. М.: ЮНИТИ, 2003. 560 с.
7. Паринов С.И. К теории сетевой экономики. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2002. 168 с.
8. Status Report on European Telework: Telework 1997, European Commission Report, 1997. <http://www.eto.org.uk/twork/tw97eto/>.
9. Гавриленко Т.Ю., Куренков В.В., Ткаченко Е.К. Развитие и применение информационных технологий как инструментарий интенсификации социальных и экономических процессов // Сб. докладов XXI Междунар. научной конференции «Актуальные вопросы современной экономической науки». г. Липецк, Россия, 21 августа 2015. Липецк: НП «Аргумент», С. 9–14.
10. De Long J.B., Froomkin A.M. The Next Economy. April 1997. <http://www.law.miami.edu/~froomkin/articles/newecon.htm>.
11. Дорот В.Л., Новиков Ф.А. Толковый словарь современной компьютерной лексики. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 608 с.

УДК: 65.011.8

ЭПОХА МАССОВОЙ КАСТОМИЗАЦИИ В СОВРЕМЕННОЙ ЭКОНОМИКЕ

И.Г. Кудрявцева, к.т.н., заведующий кафедрой

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: kudryavtseva@mirea.ru

В статье рассматриваются основные организационно-экономические и управленческие задачи, стоящие перед предприятиями в эпоху массовой кастомизации в контексте современной глобальной трансформации. Анализируются методологические основы, преимущества, условия применения, возможности и инструментарий массовой кастомизации. Предлагается повестка развития предприятий на основе концепции массовой кастомизации.

Ключевые слова: массовая кастомизация, модульное проектирование, отсрочка процесса кастомизации, цепочка поставок, позаказное производство, уникальная потребительская ценность.

AGE OF MASS CUSTOMIZATION IN CONTEMPORARY ECONOMY

I.G. Kudryavtseva

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: kudryavtseva@mirea.ru

The paper discusses the main organizational, economic and administrative objectives the enterprises face during the era of mass customization within the framework of modern global transformation. Methodological foundations, advantages, conditions of application, opportunities and tools of mass customization are analyzed. The present work offers a development agenda for enterprises based on the concept of mass customization.

Keywords: mass customization; modularization; customization process postponement; supply network; supply chains; build-to-order; unique customer value.

Прерывистость развития, сложность и динамичное изменение окружающей рыночной среды привели к значительной трансформации общих рамочных условий хозяйственной деятельности организаций. К числу причин, вынуждающих предпринимателей перенастраивать и изменять производство, следует отнести следующие тенденции, которые эксперты называют *сменой промышленной парадигмы* [1]:

- глобализация рынков и размещения производства;
- рынок покупателя (доминирующая роль клиентов);
- децентрализация производства;
- доминирующая роль и дифференциация структуры издержек;
- сокращение цикла инновационного изменения продуктов и технологий.

Эти тенденции в условиях динамичного рынка требуют от предприятий перехода к новой концепции производства или корректировки существующей. В табл. 1 перечислены некоторые современные вызовы менеджменту организаций и реакция последнего на них.

Таблица 1. Перемены в бизнес-среде и новые задачи менеджмента организаций

Детерминанты бизнеса	Реакция менеджмента организаций
<ul style="list-style-type: none"> → Усиление ценового давления → Ожидания продукции и услуг высокой потребительской ценности → Повышенные требования к сервисному обслуживанию → Широкий выбор и разнообразие продукции и услуг → Быстрое развитие технологий → Частое обновление ассортимента и предложение инновационных продуктов → Ужесточение требований к этике и социальной ответственности бизнеса → Пристальное внимание к охране окружающей сред → Расширение правового регулирования → Повышение требований к технике безопасности 	<ul style="list-style-type: none"> → Глобализация сети операций → Применение информационных, коммуникационных и цифровых технологий → Интеграция операций на основе Интернета → Управление цепочкой поставок → Управление отношениями с потребителями → Гибкая организация труда → Массовая кастомизация → Быстрый вывод продукта на рынок → Проектирование «плоской» структуры процессов → Забота об окружающей среде → Развитие «партнерства» с поставщиками и потребителями → Анализ ошибок → Планирование развития бизнеса

Перечисленные ответы менеджмента на изменение объективных условий ведения бизнеса формируют новые задачи организаций, имеющие общую целевую направленность [2]: необходимо лучше удовлетворять пожелания клиентов, обеспечивать индивидуальный подход, сокращать сроки выполнения заказов, повышать качество продукции и уровень сервиса, причем при наименьших затратах. Для их достижения применяются различные подходы – стратегии менеджмента. На рис. 1 представлены некоторые из них, сфокусированные в основном на операционных и управленческих процессах предприятия.



Рис. 1. Стратегические подходы к выполнению требований рынка.

В 1980-х гг. наибольшее значение придавалось логистике и компьютеризации производства, в 1990-х гг. фокус сместился на бережливое производство, а на рубеже XX и XXI вв. началась эра *массовой кастомизации* [3, С. 40].

Массовая кастомизация (*mass customization* – можно перевести как «массовое производство по индивидуальным заказам») – быстрое и экономичное производство для удовлетворения постоянно меняющихся уникальных желаний или потребностей потребителей [4]. В 1987 г., когда Стэнли М. Дэвис впервые использовал данное словосочетание, это был оксюморон.

Сегодня же Председатель Правительства Российской Федерации Д.А. Медведев включил массовую кастомизацию в число четырех важнейших экономических тенденций последнего времени: «К важным экономическим инновациям последнего времени относятся... индивидуализация товаров и услуг, приходящая на смену стандартизированному массовому производству. Конечно, это новая индивидуализация, а не возврат к доиндустриальному ремесленному производству. Это производство с учетом запросов конкретного потребителя...» [5, С. 12].

В эксклюзивном интервью журналу «Секрет фирмы» гуру новой экономики Ф. Сэм Хилл, президент фирмы Helios Consulting и автор знаменитой книги «60 трендов за 60 минут», обрисовал наиболее важные тенденции развития маркетинга следующим образом: «Эпоха массового производства наступила в результате промышленной революции, но сегодня также из-за глобальных изменений наступает эпоха массовой кастомизации» [6]. «Мы стоим на пороге массовой кастомизации», – подтверждает главный футуролог и главный технолог компании Cisco Systems Дэйв Эванс [6].

Исследования конъюнктуры большинства рынков продукции и услуг свидетельствуют о массовой кастомизации потребительских запросов. По данным компании Sales Business, спрос на кастомизированные продукты непрерывно возрастает (в 2006 г. доля спроса на продукты с индивидуальной конфигурацией составляла 28,8%, а уже через два года – 51,6%), причем во всех сферах экономической деятельности. На конечных потребителей приходится 58% заказчиков кастомизированных продуктов; 11,5% – это госструктуры; 9,1% – крупный бизнес и 21,4% – субъекты малого предпринимательства [7].

Для предприятий-производителей массовая кастомизация означает получение как экономического преимущества от каждого ее компонента (низких затрат от «массовости», от «кастомизации» – индивидуального подхода к каждому потребителю), так и синергического эффекта от их объединения. Массовая кастомизация обеспечивает такое же разнообразие продукции, как единичное и мелкосерийное производство (ориентация на процесс), по себестоимости, сопоставимой с массовым и крупносерийным производством стандартизированной продукции (ориентация на продукт).

Массовая кастомизация предполагает не просто *разнообразие*, а именно персонализацию. В современном контексте разнообразие означает производство и сбыт широкого ассортимента стандартизированных продуктов в расчете, что конкретный потребитель найдет и купит что-то более-менее подходящее. В рамках концепции массовой кастомизации производство рассматривается как *следствие* желаний или потребностей отдельного клиента (когда свои желания он выражает экономически), а именно, эффективное изготовление в точности того, чего хочет покупатель, с последующей трансформацией каналов сбыта в каналы спроса.

Экономическое предложение представляет уникальную ценность, когда обладает следующими признаками [8]:

- *единственное* в своем роде – не больше и не меньше, а именно *то*, чего хочет клиент;
- *исключительное* по своим отдельным характеристикам, т.е. разработанное *в полном соответствии* с индивидуальными потребностями клиентов (могут совпасть потребности нескольких клиентов, а значит, этой группе подойдет одно и то же предложение);
- *особенное*, т.е. претворенное в жизнь в особый момент времени, тогда, *когда нужно* конкретному клиенту.

Воплощение концепции массовой кастомизации ставит перед компаниями чрезвычайно сложные организационно-экономические и управленческие задачи, решение которых требует согласованного взаимодействия многих факторов, творческого и активного использования всех ресурсов организации, а также функциональной интеграции, в первую очередь, маркетинга, финансов, производства (операций), проектирования и логистики (табл. 2). Тем не менее, при всей своей сложности массовая кастомизация стала *новым императивом* для современного производства, и уже имеются многочисленные свидетельства ее реализации в сфере услуг (в банковском, страховом, ресторанном бизнесе, в сфере рекреационных услуг, общественного питания, гостеприимства, в розничной и оптовой торговле и т.д.).

Таблица 2. Техничко-экономическая характеристика массовой кастомизации

Признак	Содержание
1. Номенклатура продукции	Большое разнообразие, повторяемость
2. Объем выпуска однородной продукции	Большой; повторяющимися или неповторяющимися сериями (партиями) переменного или постоянного размера
3. Тип процессов	Модульные процессы
4. Стратегия процесса	Сфокусированная на модульном предложении
5. Технологическое оборудование и оснастка	Гибкое, быстро перенастраиваемое
6. Средства автоматизации	Средства гибкой автоматизации производства: обрабатывающие центры с компьютерным управлением, промышленная робототехника, ГПС (CAD/CAM, FMS, CIM, AMT)
7. Скорость продвижения материального потока	Быстрое движение предметов обработки
8. Запасы материалов	Постоянно низкий уровень по отношению к выходу
9. Незавершенное производство	Величина переменная с тенденцией к снижению за счет принципов JIT, Kanban и бережливого производства
10. Обслуживание рабочих мест (обеспечение инструментом, материалами, контроль, техническое обслуживание и ремонт)	Устойчивое, но сложное в организационном отношении, используется смешанная форма обслуживания рабочих мест, достаточно высокий уровень разделения труда по функциям обслуживания
11. Нормативная база, регламенты выполнения работ	Рабочих инструкций много, они разнообразны; наличие повторяющихся работ сокращает разнообразие рабочих инструкций
12. Подготовка персонала для работы на рабочих местах	Рабочие должны быть обучены необходимой кастомизации, а также комплексу работ, чтобы при необходимости менять работу и рабочие места в пределах своего подразделения
13. Внутрипроизводственное хранение	Хранение с использованием малых зон складирования
14. Выпуск конечной продукции	Конечная продукция нередко производится по заказам и не хранится
15. Производственное расписание	Ориентировано на выбор вариантов модулей, является комплексным и преимущественно связано с адаптацией к заказам клиентов
16. Структура затрат	Как правило, постоянные издержки велики, а переменные затраты - незначительны
17. Цена продукции и изменений	Фиксированные цены с возможной наценкой, низкая цена любых изменений
18. Ценообразование	Цена определяется исходя из потребительской ценности товара
19. Использование оборудования	15–80%

Условия эффективности массовой кастомизации

В основе эффективной массовой кастомизации лежит ряд *принципов*, среди которых:

- ориентация на конкретного клиента на основе тесного взаимодействия поставщика и клиента на всех этапах цикла выполнения заказа, а также длительных и прочных взаимоотношений (лучше на уровне стратегических союзов);
- ориентация на процессы;
- модульная архитектура продуктов и процессов;

- функциональная интеграция.

Поэтому *необходимыми условиями* массовой кастомизации являются:

- применение модульного принципа проектирования продуктов и процессов; эффективная система оперативно-календарного планирования, гибкость персонала, производственных мощностей и структуры предприятия;
- поддерживающие цепочки поставок и быстрый товароборот (для «сближения» капитальных расходов с операционными, что резко повышает гибкость реагирования на изменения запросов потребителей) [3];
- самое главное – руководители организаций должны научиться мыслить категориями массовой кастомизации, принимать решения и действовать в рамках ее концепции.

Модульная архитектура продукта/процесса

Термин «модульность» можно рассматривать как свойство и принцип построения системы, в основе которых лежит возможность ее декомпозиции на ряд внутренне связанных между собой модулей. Сущность *модульного принципа* – комплектование разнообразных сложных нестандартных продуктов с различными характеристиками из типовых модулей – одинаковых (стандартных и унифицированных) первичных общих компонентов (частей) небольшого, экономически обоснованного количества типов и типоразмеров.

Достоинства модульного подхода хорошо известны. К их числу относятся:

- возможность быстро создавать из типовых модулей различные компоновки применительно к конкретным нуждам,
- оперативно разъединять, заменять отдельные модули более совершенными или вводить в состав продукта новые модули с целью получения систем с другими компонентами и характеристиками при модернизации или ремонте.

Использование модульного проектирования резко сокращает сроки и затраты на разработку продукта, позволяет широко применять современные системы автоматизированного конструирования на базе САД/САМ. В таких системах автоматически выполняются стандартные элементы конструкции изделия и сопряжение отдельных его элементов, возможны согласованная работа нескольких интерфейсов (проектировщиков и конструкторов), формирование перечня необходимых для производства инструментов, операций обработки и кодов для станков с ЧПУ.

Модули – это компоненты конечной продукции, предварительно изготовленные по отдельно обоснованному типу процессов (чаще всего – массовому и крупносерийному), на основе которых формируются типоразмерные ряды и осуществляется выпуск конечной продукции в ряде модификаций, в том числе по заказам конкретных потребителей, сериями требуемого размера (тип процесса зависит от размера серии). С производственной точки зрения модуль – это самостоятельное изделие, имеющее автономную документацию на изготовление, полностью собранное, прошедшее функциональную проверку и готовое к монтажу.

Для получения выгоды от «массовости» и от «кастомизации» компании должны, прежде всего, проектировать продукты с модульной архитектурой. *Модульная архитектура продукта* обладает двумя свойствами:

1. Каждый модуль состоит из совокупности компонентов, которая полностью реализует одну или несколько функций продукта, т.е. модуль представляет собой *функциональный блок*;
2. Четко определено взаимодействие (интерфейс) между функциональными блоками и, как правило, модуль является основой функциональности продукта.

С маркетинговой точки зрения, такая двухэлементная архитектура продукта (из набора модулей и систем связей, которые динамично их объединяют) включает полное множество продукции и услуг, которое компания предлагает клиентам в целом, с подмножествами: что именно она поставит конкретному покупателю в каждом конкретном случае.

Вместе с тем понятие модульного проектирования сводится не только к представлению

сложных нестандартных комплексов в виде набора отдельных функциональных блоков. Например, предприятия сферы услуг (страховые и авиакомпании, гостиничные сети и пр.) выстраивают свою модульную архитектуру не из материальных компонентов, а из определенных процессов. Производственные и сервисные процессы необходимо спроектировать так, чтобы они тоже состояли из независимых модулей, которые можно легко перемещать или перекомпоновывать для поддержки разных вариантов распределительных сетей. В этом контексте *модуль* можно интерпретировать как последовательность логически связанных частей процесса, оформленных как отдельный частичный процесс.

Блочно-модульный принцип проектирования процесса предполагает предварительное изготовление и последующую кастомизацию (сортировку, отбор и группирование в уникальные комбинации) модулей с разделением этих двух процессов – изготовления и кастомизации – в пространстве и времени (в пределах *полного цикла заказа* – от момента размещения заказа до его исполнения). Для эффективной массовой кастомизации компании с успешным опытом ее реализации (Dell, Toyota, Hewlett-Packard, Build-A-Bear и др.) прибегают к концепции *отсрочки процесса кастомизации* (process postponement – дословно «перенос/отсрочка процесса») в полном цикле заказа [3]. Суть ее заключается в одновременной минимизации внутреннего разнообразия производственной системы и максимизации внешнего разнообразия (вне системы, на виду у клиента). На практике это означает перенос/отсрочку процесса кастомизации продукта как можно ближе (по времени) к конечным этапам/операциям процесса выполнения заказа и как можно ближе (в пространстве) к точке конечного сбыта (т.е. к клиенту). Иными словами, требуется по возможности максимально сдвинуть к концу цепи поставок тот этап полного процесса заказа, который придает изготавливаемому продукту свойства, заданные Заказчиком.

Взаимодействие с клиентом

Массовая кастомизация – надежный путь вверх по шкале потребительской ценности (от продукции к услугам и далее – от услуг к впечатлениям). Если продукция приводится в соответствие с потребностями конкретного покупателя, она автоматически трансформируется в услугу. Соответствие услуги личным потребностям клиента – это уже гарантия благоприятного впечатления [8]. Для использования массовой кастомизации как способа подъема по шкале потребительской ценности дополнительно к модульной архитектуре требуется *структура среды* взаимодействия с клиентом, чтобы ограничить выбор последнего разумным количеством возможных комбинаций модулей с точки зрения затрат времени и усилий. Так, в 1992 г. Toyota радикально расширила традиционное для североамериканского рынка представление о допустимом наборе опций при заказе автомобиля на выбор потребителю. Компания при этом взяла на себя обязательства выполнять заказы в течение трех дней. Однако Toyota столкнулась с действием правила Парето: 20% комплектаций приносили 80% доходов. После этого количество вариаций сократили на пятую часть [3].

Структуру среды образуют два компонента:

1. Инструмент моделирования для сопоставления потребностей клиента с возможностями компании;
2. Модель (формат) взаимодействия, т.е. впечатление, которое позволяет клиенту четко определиться, чего он хочет на самом деле [8].

Инструментами моделирования могут служить тематические каталоги, анкеты, матрицы, интерактивные инструменты моделирования, популярные «чистые листы бумаги» и др., которые, с одной стороны, помогают разобраться, чего клиент хочет, а с другой – предоставить ему желаемое. Здесь важно не забывать про обучение агентов по продажам работе и с самим инструментом, и с клиентами с помощью отобранного инструмента.

В ходе моделирования взаимодействия клиента с продукцией компании могут воспользоваться тремя принципиальными подходами:

1. демонстрация всех возможных комбинаций товаров и услуг сразу («гигантское меню»);
2. постепенно по мере надобности;
3. вообще без демонстрации.

Отсюда различают три формата взаимодействия. Когда количество возможных вариантов комплектации ограничено разумным числом, компании могут продемонстрировать все возможные комбинации и позволить клиенту изучить их. Второй подход к формату взаимодействия заключается в постепенной демонстрации всех возможных вариантов по запросу клиента с помощью соответствующих инструментов моделирования. Третий подход – намеренное сокрытие инструментов моделирования, когда клиенты хотят получить уникальное предложение, но не желают тратить время на просмотр каталогов, на выбор. Например, в страховом бизнесе стараются лишней раз не беспокоить своих озабоченных, растерянных или просто смущенных клиентов лишними и неприятными подробностями процедуры оценки размеров страхового риска.

Функциональная интеграция

При разработке модульной архитектуры продуктов и процессов, реализации концепции отсрочки кастомизации, структуризации среды взаимодействия компания должна переосмыслить и унифицировать конструкции своих продуктов, процессы, используемые для изготовления и доставки продуктов клиентам, а также конфигурацию всей цепи поставок. Проектирование процесса должно быть гибким и выдерживать как конструкторские, так и технологические изменения продукции. Для поддержки массовой кастомизации необходима достаточно динамичная и подвижная цепь поставок, обладающая двумя свойствами:

1. способностью поставлять базовый продукт в звенья (на предприятия), где будет выполняться экономически эффективная его кастомизация;
2. достаточной гибкостью и способностью быстро принимать и доставлять заказы отдельных клиентов на продукты, отвечающие индивидуальным потребностям.

Для разработки и принятия таких сложных решений требуется функциональная интеграция, по крайней мере, маркетинга, проектно-конструкторских разработок, финансов, производства и логистики распределения [3]. Следовательно, массовая кастомизация должна стать атрибутом каждой функциональной стратегии, более того, служить основой стратегии позиционирования компании.

Интеграция функций проявляется в формировании межфункциональной команды с четким распределением и согласованием обязанностей между ее членами. Маркетологи должны заниматься определением объема продаж кастомизированных продуктов и рынков сбыта, поиском способов кастомизации. Проектировщики и конструкторы должны так конфигурировать продукт, чтобы его модульная архитектура позволяла выполнять процесс кастомизации в оптимальном звене цепи поставок. Производственники и логисты должны заниматься развитием и управлением механизмов реализации маркетинговых и проектно-конструкторских решений. Финансисты должны просчитать все затраты с калькуляцией по отдельным видам деятельности и провести сравнительный финансовый анализ альтернативных вариантов массовой кастомизации.

Экономические аспекты массовой кастомизации

Опыт компаний, развивающих массовую кастомизацию, свидетельствует о том, что требуются значительные первоначальные капиталовложения: на разработку необходимой продукции и процессов ее изготовления, на гибкое, быстро перенастраиваемое оборудование и средства технологического оснащения, на гибкий персонал и встраивание в бизнес-процессы новых технологий, на упаковку и доставку товаров, на разработку САПР, ГПС и т.п. Специалисты отмечают, что большую долю первоначальных единовременных затрат или даже полностью можно возместить за счет сокращения потерь из-за неточных прогнозов продаж (включая

затраты на персонал, хранение товарных запасов, стоимость обслуживания), снижения совокупных издержек в сфере товародвижения, прежде всего, в результате отказа от посредников, минимизации товарно-материальных запасов, транспортных расходов, а также предоплаты (авансовых платежей) клиентами.

Крупнейший маркетолог Б. Дж. Пайн вообще утверждает, что «массовая кастомизация в конечном счете обойдется компании приблизительно во столько же, во сколько обойдется массовое производство (а иногда даже меньше)» [8, С. 133]. По его мнению, необходимо учитывать косвенный эффект от использования массовой кастомизации - снижение степени потребительской уступки, т.е. разницы между тем, на что клиент готов согласиться, и тем, чего на самом деле он хочет. В эпоху массовой кастомизации компании должны эффективно и систематически снижать степень потребительской уступки, возникающей каждый раз, когда клиент сталкивается с унифицированными продуктами и услугами, разработанными в расчете на некоего анонимного «среднего покупателя».

Взгляд на массовую кастомизацию в этой плоскости позволяет увидеть ее экономические преимущества одновременно по нескольким направлениям.

- Наценки. Уникальное товарное предложение компании клиент ценит выше, чем любое другое, и в результате готов больше за него платить.
- Меньшие скидки. Когда предложение продается со скидкой, по сути, компания платит клиентам за то, что они идут на большие уступки. Чем меньше их уступка, тем меньше сниженные цены, чтобы продать продукцию.
- Большая пожизненная ценность клиента. В сравнении с любым конкурентом компания знает своих клиентов лучше и больше, а потому последние обращаются к ней всякий раз, когда ищут на рынке то, что компания предлагает.
- Расширение клиентской базы компании за счет привлечения новых клиентов с меньшими затратами. У клиентов осталось благоприятное впечатление от компании, и они рассказывают о нем своим друзьям и коллегам (в среднем восьми человекам), многие из которых тоже захотят обратиться именно к данной компании. Новые клиенты, в свою очередь, расскажут о компании своим знакомым и т.д.
- Тесная связь и удержание существующих клиентов. Чем больше клиент делится своими потребностями и пожеланиями с компанией, тем труднее ему будет получить тот же уровень обслуживания у конкурента.
- Развитие конкурентоспособности. Компании, которые систематически снижают степень потребительской уступки, удовлетворяют те потребности клиентов, которые остались незамеченными их конкурентами – сторонниками концепции массового производства.

Массовая кастомизация в России

Массовая кастомизация стала философией бизнеса практически всех передовых компаний в мире. К сожалению, все разговоры о начале эпохи массовой кастомизации в России преждевременны и беспредметны. Причины подобного положения очевидны: неразвитость товарных рынков, отсутствие современной информационной и транспортной инфраструктуры, производственные системы, спроектированные для функционирования в эпоху массового производства, дефицит средств у предприятий для обеспечения хотя бы необходимых условий массовой кастомизации, управленческий менталитет массового производства – список можно продолжить.

Ведущие мировые производители все чаще переходят к модели развития на платформе массовой кастомизации, представляя собой очень перспективные образцы с огромным потенциалом. Становится все очевиднее, что для развития конкурентоспособности, создания прибыльного и эффективного бизнеса, повышения производительности труда российским предприятиям придется выходить на новую траекторию роста, с новыми темпами и с новым качеством.

Литература:

1. Биннер Х. Управление организациями и производством: От функционального менеджмента к процессному. М.: Альпина Паблишер, 2010. 282 с.
2. Грундиг К.-Г. Проектирование промышленных предприятий: Принципы. Методы. Практика. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 340 с.
3. Хейзер Дж., Рендер Б. Операционный менеджмент. СПб.: Питер, 2015. 1056 с.
4. Davis S.M. Future Perfect. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1987. 243 p.
5. Медведев Д. Новая реальность: Россия и глобальный вызовы // Вопросы экономики. 2015. № 10. С. 5–29.
6. Котин М. Частный случай [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ipnou.ru/article.php?idarticle=001346> (дата обращения: 20.01.16).
7. Вапнярская О.И. Генезис и новые подходы к определению кастомизации // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 6. С. 189–201.
8. Пайн Б. Дж., Гилмор Дж. Х. Экономика впечатлений: Работа – это театр, а каждый бизнес – сцена. М.: Альпина Паблишер, 2011. 330 с.

УДК: 334.752

**ЗАРУБЕЖНАЯ И ОТЕЧЕСТВЕННАЯ ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ
УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
НА ОСНОВЕ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ
ПРОЗРАЧНОСТИ ВЕДЕНИЯ БИЗНЕСА**

В.М. Тумин, д.э.н., заведующий кафедрой
П.А. Костромин, старший преподаватель
А.С. Вихрова, ассистент

*Кафедра экономики, организации и управления инновационным развитием предприятий,
Институт инновационных технологий и государственного управления,
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: vm@tumin.net*

В статье представлены зарубежные и российские стандарты по управлению устойчивым развитием промышленных предприятий. Охарактеризованы особенности процессного подхода к устойчивому развитию предприятия. Выявлены основные причины и преимущества внедрения этих стандартов в практику деятельности российских и зарубежных предприятий. Проанализирован уровень раскрытия нефинансовой отчетности предприятий в соответствии с основными стандартами.

Ключевые слова: промышленное предприятие, устойчивое развитие, управление устойчивым развитием, нефинансовая отчетность.

**FOREIGN AND RUSSIAN PRACTICE OF INDUSTRIAL ENTERPRISE
SUSTAINABLE DEVELOPMENT MANAGEMENT BASED
ON INCREASE OF BUSINESS INFORMATION TRANSPARENCY**

V.M. Tumin,
P.A. Kostromin,
A.S. Vihrova

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: vm@tumin.net*

In the paper, foreign and Russian standards on industrial enterprise sustainable development have been presented. Special aspects of process approach for the enterprise's sustainable development have been described. The main reasons and advantages of these standards implementation into Russian and foreign enterprise activity have been revealed. The enterprise nonfinancial accountability evaluation in accordance with the basic standards has been also analyzed.

Keywords: industrial enterprise, sustainable development, sustainable development management, nonfinancial accountability.

Отечественная практика управления развитием промышленных предприятий (по примеру зарубежной) сегодня все в большей мере опирается на многочисленные стандарты принятия решений. В них, по возможности, компромиссно увязываются, с одной стороны, социально-экономические интересы собственников и наемных работников-производителей продукции, а с другой – интересы прочих экономических субъектов, прямо или косвенно связанных с конечными результатами деятельности предприятий: в целом государства и его населения, регионов, поставщиков сырья и энергии, сбытовых организаций, потребителей продукции, включая физических лиц, и пр.

Расширяющаяся практика управления через систему стандартов наблюдается во всех важных сферах деятельности предприятий, одной из которых является сфера, обеспечивающая их устойчивое развитие. Под устойчивым развитием здесь и далее авторы понимают такое развитие предприятий, при котором могут быть достигнуты сбалансированные с требованиями рынка изменения объемов производства качественной и безопасной для потребителей и окружающей среды продукции, не только удовлетворяющие текущим социально-экономическим интересам собственников и персонала предприятий, но и социо-эколого-экономические интересы прочих заинтересованных сторон.

В настоящее время проблема устойчивого развития предприятий в отечественной науке и практике находится в стадии активной разработки, о чем свидетельствуют часто весьма расходящиеся между собой мнения разных авторов по одним и тем же обсуждаемым вопросам. Соответственно, в стадии разработки находится и база стандартов, которые должны были бы служить руководством к действию в деле обеспечения устойчивого развития предприятий. В этой связи интерес представляет выявление особенностей содержания и использования стандартов, успешно применяемых в зарубежной практике, с последующей возможностью использования их отдельных положений на отечественных предприятиях.

Согласно мировому опыту, стандарты по различным аспектам социо-эколого-экономической деятельности предприятий содержат типовые практики (не противоречащие признанным международным бизнес-сообществом нормам) и отражают наиболее вероятные ситуации и варианты их решения, которые могут возникать в процессах функционирования предприятий и управления ими. При этом в соответствии со сформированными в международном бизнес-сообществе нормами, каждый из перечисленных нами ранее экономических субъектов-интересантов в конечных результатах деятельности предприятий должен иметь возможность отслеживать «успешность» или «неуспешность» применения указанных практик, влиять на процессы их формирования и практического применения. Последнее условие предполагает значительную прозрачность в работе предприятий и соответствующее наличие достаточно широкой информационной базы о результатах такой работы, находящейся в открытом доступе.

Своевременное отслеживание и влияние на процессы управления результатами деятельности предприятий со стороны экономических субъектов-интересантов требует наличия у них, во-первых, финансово-экономической отчетной информации, ориентированной на экономическую сферу деятельности предприятий, и, во-вторых – нефинансовой отчетной информации, более ориентированной на социо-экологические сферы деятельности). Заметим, что перечень, содержание и объемы подобной отчетности либо жестко регламентируются государством (это касается большинства случаев с финансово-экономической отчетностью), либо определяются предприятиями самостоятельно (в случаях с нефинансовой отчетностью).

В последние годы в зарубежной практике ведения бизнеса все в большей мере прослеживается тенденция к расширению регламентируемой государством отчетности, главным образом, за счет вовлечения в указанную сферу нефинансовой отчетности, в виде стандартов по корпоративной социальной ответственности, экологическому бизнесу, устойчивому развитию и прочим сферам социо-экологической деятельности др. Как результат – усиливается информационная прозрачность в деятельности предприятий, когда всё больше информации, ранее считавшейся конфиденциальной, становится доступной для ознакомления всех экономиче-

ских субъектов-интересантов, включая широкую общественность. Отмеченную тенденцию к расширению сферы раскрытия информации можно проследить по следующим примерам.

За рубежом к основным стандартам, отражающим отдельные аспекты управления устойчивым развитием, относятся [1]:

1. Social Accountability 8000:2008 Международной организации по социальной ответственности;
2. IC CSR-08260008000 «Социальная ответственность организации. Требования» Международного комитета по корпоративной социальной ответственности;
3. ISO 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности» Международной организации по стандартизации;
4. AccountAbility 1000 Assurance Standard международной организации Account Ability;
5. ISO 20121:2012 «Системы менеджмента экологической устойчивости мероприятий. Требования с руководством пользователя» Международной организации по стандартизации;
6. Sustainability Reporting Guidelines Глобальной инициативы по отчетности (GRI), который является общепризнанным форматом отчетности.

Развитием стандартов International Standards Organisation (ISO) занимался Японский институт стандартов (JSA), внедрявший философию устойчивого развития во всеобщий менеджмент качества (Total Quality Management – TQM). Результатом данного процесса стали два стандарта: JIS/TR Q 0005 Quality management system – Guidelines for sustainable growth («Система менеджмента качества. Рекомендации по устойчивому росту») и JIS/TR Q 0006 Quality management system – Guidelines for self-assessment («Система менеджмента качества. Рекомендации по самооценке») [2], которые используются для развития стандартов ISO. Согласно названным стандартам, все сферы социо-эколого-экономической деятельности предприятий можно подразделить на две большие группы, тесно связанные, во-первых, с областью их финансово-экономической деятельности и, во-вторых, с областью социо-экологической деятельности.

Основные принципы управления устойчивым развитием предприятий, применительно к областям финансово-экономической и социо-экологической деятельности, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные принципы управления устойчивым развитием предприятий [3–8]

Принципы управления в области финансово-экономической деятельности предприятий	Принципы управления в области социо-экологической деятельности предприятий
Принципы вовлеченности интересов заинтересованных сторон при принятии решений о направлениях экономической деятельности предприятия	Принципы социальных прав и гарантий персонала
Принципы подотчетности воздействия на экономическую среду	Принципы защиты интересов потребителей и экологии
Принципы реагирования на запросы поставщиков, потребителей и конкурентов	Принципы поддержки местного сообщества и окружающей среды
Принципы верховенства закона и соблюдения международных норм	Принципы социальной охраны окружающей среды

Основные положения управления устойчивым развитием предприятия были положены в основу стандартов International Standards Organisation (ISO) серии 9000. Данные стандарты закладывают основы понимания менеджмента качества, лежащего в основе устойчивого развития предприятия и предлагает схему использования процессного подхода для непрерывного совершенствования всех процессов на предприятии (рис. 1).

В России стандарты International Standards Organisation (ISO) использованы как база для разработки стандартов ГОСТ, например, при разработке национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 54598.1 – 2011 «Менеджмент организации. Руководство по обеспечению устойчивого развития». Согласно данному стандарту, устойчивое развитие – это способ управ-

ления организацией, предусматривающий долгосрочную экономическую эффективность деятельности организации при выполнении требований охраны окружающей среды и социального развития организации [10]. ГОСТ ИСО 9000-2011 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» и ГОСТ ИСО 9001-2011 «Системы менеджмента качества. Требования». ГОСТ ИСО 9000-2011 [11] составлен на основе стандарта ISO 9000 «Quality management systems. Fundamentals and vocabulary». Исходя из данного документа, в целях устойчивого развития менеджмент качества, как и другие аспекты менеджмента, должен стремиться к постоянному улучшению результатов, с учётом потребностей всех заинтересованных сторон. Кроме того, развитие системы управления предприятием предусматривает соблюдение восьми основных принципов менеджмента, идентичных принципам менеджмента стандарта ISO, представленных в табл. 2.



Рис. 1. Реализация цикла «Plan-Do-Check-Act» в TQM [9].

Таблица 2. Основные принципы менеджмента для улучшения деятельности предприятий в разных системах стандартов [2, 12, 13]

Принципы		
ISO 9000	ГОСТ ИСО 9000-2011	TR Q 0005
Фокус на потребителя	Ориентация на потребителя	Создание ценности для потребителя Общественные ценности
Лидерство	Лидерство руководителя	Лидерство в предвидении
Вовлечение заинтересованных сторон	Вовлечение работников	Понимание ключевых компетенций Вовлеченность персонала
Процессный подход	Процессный подход	Процессный подход
Системный подход к менеджменту	Системный подход к менеджменту	Оперативность Автономность
Постоянное улучшение	Постоянное улучшение	Всеобщая оптимизация
Использование фактов при принятии решений	Принятие решений, основанное на фактах	Принятие решений, основанное на фактах Личное и организационное самообучение
Взаимовыгодные отношения с поставщиками	Взаимовыгодные отношения с поставщиками	Сотрудничество с партнёрами

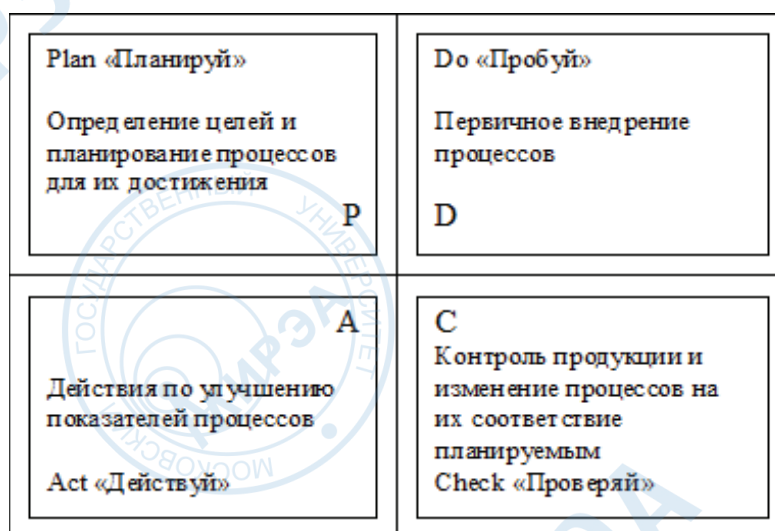


Рис. 2. Цикл PDCA [14].

При этом международные и национальные стандарты, как правило, освещают различные области процесса устойчивого развития, что отражено в табл. 3.

Таблица 3. Охват различными стандартами отдельных областей устойчивого развития [2–4, 10–12, 14, 16–28]

Стандарты	Области устойчивого развития		
	Экономические	Экологические	Социальные
Международные договоры и хартии			
Глобальный договор ООН		x	x
Международные стандарты			
Social Accountability 8000:2008			x
AccountAbility 1000 Assurance Standard	x		
ISO 20121:2012, ISO 26000:2010	x	x	x
Sustainability Reporting Guidelines	x	x	x
Ethics Compliance Management System Standard 2000	x		x
IC CSR-08260008000	x		x
Национальные договоры и хартии			
Социальная хартия российского бизнеса	x	x	x
Национальные стандарты			
BS 8900:2006, BS 8901:2009	x	x	x
SD 21000 :2005	x	x	x
Национальный стандарт РФ. ГОСТ Р 54598.1-2011	x	x	x

Анализ основных нормативно-правовых актов в управлении устойчивым развитием позволил выделить ряд особенностей данного процесса:

1. Управление устойчивым развитием должно охватывать все подсистемы на промышленном предприятии, а его совершенствование необходимо проводить по всем функциям управления.

2. Управление устойчивым развитием предприятия должно учитывать интересы не только собственников, но и прочих заинтересованных сторон.

3. Совершенствование процесса управления устойчивым развитием предприятия необходимо проводить на основе общепризнанных стандартов в данной сфере, так как их использование значительно повышает обоснованность управленческих воздействий и способствует привлечению инвесторов и созданию благоприятного имиджа деятельности предприятия.

В этой связи чрезвычайно актуальным становится поиск новых решений по совершенствованию управления устойчивым развитием предприятий, особенно в условиях сложной экономической ситуации. В противном случае отечественные предприятия будут всё больше отставать от зарубежных конкурентов [29].

К таким решениям, по нашему мнению, относятся решения, связанные с новыми воззрениями по формированию и представлению нефинансовой отчётности. В рамках информационной теории конкуренции рынок состоит из взаимодействующих решений потребителей, производителей и собственников ресурсов [30]. Во многом такие решения определяются репутацией компании, которая также зависит и от её информационной прозрачности.

Практическое внедрение новых стандартов в практику управления устойчивым развитием компаний из стран Западной Европы, США и ведущих азиатских стран происходит через создание нефинансовой отчётности. Преимуществами развития нефинансовой отчётности являются [12]:

- снижение рисков предпринимательской деятельности;
- рост конкурентоспособности;
- укрепление доверия инвесторов;
- активизация диалога со всеми заинтересованными сторонами и повышение лояльности потребителей;
- улучшение репутации компании путём позитивного вклада в социально-экономическое и экологическое развитие региона;
- создание благоприятных условий для реализации долгосрочной стратегии путём соблюдения балансов интересов основных заинтересованных сторон компании.

Кроме того, следует отметить, что нефинансовая отчётность удовлетворяет интересы сразу многих заинтересованных сторон, цели которых зачастую различаются. Например, собственники предприятий стремятся повысить прибыльность бизнеса, наемные работники желают получить высокое вознаграждение за труд и социальные гарантии, население заинтересовано в комфортных условиях проживания в районе деятельности предприятий, тогда как государство должно получать налоги, обеспечивать сохранение природных ресурсов и окружающей среды, развивать регионы и территории. Поэтому для обеспечения устойчивого развития ни одна из целей каждой из заинтересованных сторон не должна доминировать и принижать значение другой, и переход к концепции устойчивого развития на уровне предприятия возможен лишь при внесении изменений в существующую систему приоритетов на наивысшем уровне управления предприятием, а также принятие необходимости добровольного раскрытия и публикации нефинансовой отчётности [31].

Важной особенностью развития нефинансовой отчётности в мире является рост формализации требований к её содержанию на основе ужесточения законодательства, регулирующего прозрачность деятельности корпораций и публикацию данных по так называемому «экологическому следу» воздействия на окружающую среду. Такие требования существуют в ряде стран Западной Европы: во Франции, Великобритании, Дании, Швеции, Нидерландах, а также в Канаде, ЮАР. Повышается значимость общественных организаций: профсоюзов, организаций по защите природы, культурно-исторического наследия и прочих социальных и политических объединений граждан, требующих от корпораций обязательного учета социо-экологических стандартов деятельности, во взаимосвязи с интересами и целями развития окружающего сообщества.

Как следствие, с 2000 по 2012 гг. количество зарегистрированных нефинансовых отчётов выросло более, чем в 8 раз. На конец 2012 г. нефинансовые отчёты имелись примерно у 6800 компаний, при этом с 1991 г. каждые 5 лет количество данных отчётов удваивалось. Наибо-

лее развитую практику публикации нефинансовой отчётности имеют Великобритания, США, Япония и страны Западной Европы. На фоне данных стран российские компании выглядят скромно, однако в целом страны БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай, Южная Африка), куда входит Россия, демонстрируют опережающие средние значения темпов публикации нефинансовой отчётности.

Динамика публикации нефинансовых отчётов, зарегистрированных в специализированном регистраторе отчётов Corporateregister в 2000–2012 гг. представлена на рис. 3.

Считаем важным подчеркнуть, что крупнейшие мировые корпорации связывают свою инвестиционную привлекательность с наличием объёмной публичной нефинансовой отчётности. Данные корпорации представляют самые разные отрасли экономики. Несмотря на это, можно сделать общий вывод о наличии тесной корреляционной связи, с одной стороны, между степенью воздействия отрасли промышленности на окружающую среду и другие сферы деятельности, отслеживаемые самыми разными экономическими субъектами-интересантами, с другой – долей предприятий, расширяющих публикацию нефинансовой отчётности.

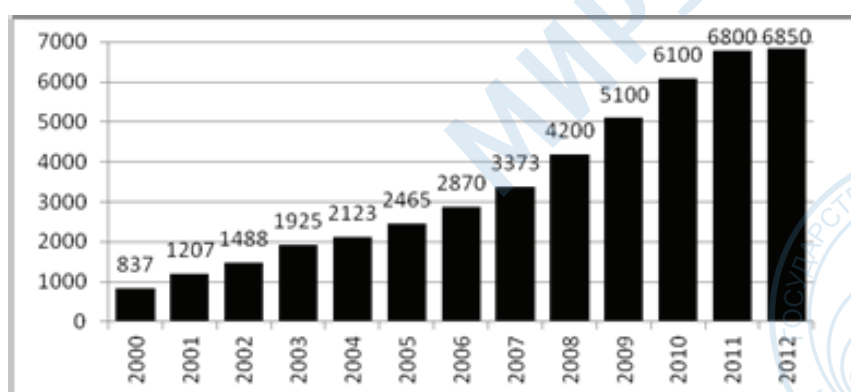


Рис. 3. Динамика публикации нефинансовых отчётов в мире в 2000-2012 гг. [19].

Отсюда правомерен, в частности, следующий вывод: корпорации промышленного сектора, находящиеся под пристальным и жестким контролем социума, берут на себя неизмеримо большие обязательства по раскрытию и публикации информации по сравнению, например, с отраслями торговли.

На рис. 4 представлено распределение долей предприятий в отраслевом разрезе, раскрывающих и публикующих нефинансовую отчётность.

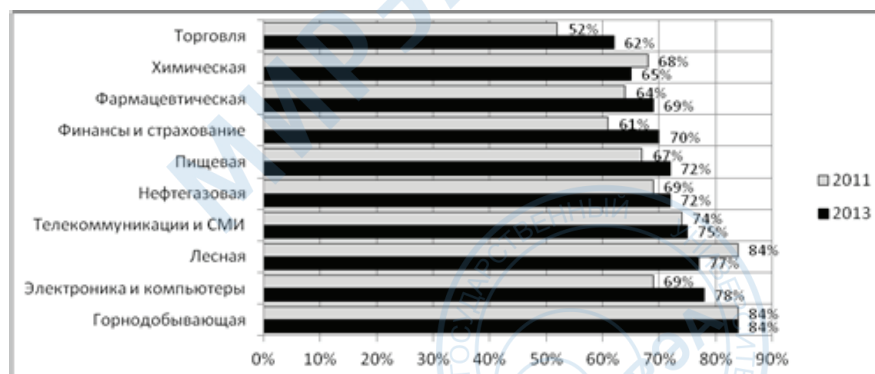


Рис. 4. Распределение предприятий в отраслевом разрезе, раскрывающих и публикующих нефинансовую отчетность в 2011 и 2013 гг. [28].

Около 80% крупнейших корпораций мира готовят отчёты об устойчивом развитии, более 40% создали специализированные сайты о корпоративном устойчивом развитии. При этом в области промышленного производства 56,2% корпораций готовят электронную версию нефинансового отчёта, который публикуется на официальном сайте, а 45,7% корпораций публикуют отдельный отчёт в области устойчивого развития, подготовленный по одному из существующих стандартов в области нефинансовой отчётности [26]. Одним из наиболее проработанных документов в этой области является Руководство по отчётности в области устойчивого развития (SRG), разработанное Всемирным Банком и Глобальной инициативой по отчётности (GRI) [8].

Более трети крупных компаний руководствуются данной системой. В рамках совершенствования требований к раскрытию нефинансовой информации Глобальная инициатива по отчётности (GRI) выпустила четвертую версию Руководства по отчётности в области устойчивого развития (G4), отвечающую принципам Глобального договора Организации Объединённых Наций (ООН) по устойчивому развитию, принципам устойчивого развития Организации Экономического Сотрудничества и Развития (ОЭСР) и руководящим принципам ООН в сфере бизнеса и прав человека [21].

Данная система отчётности является наиболее распространённой для публикации нефинансовых отчётов, так как в ней проработаны наиболее существенные для заинтересованных сторон предприятия позиции, по которым предоставляются данные. В его разработку внесли вклад British Petroleum, Ford, General Motors, Shell и другие. К 2014 г. из 21309 нефинансовых отчётов 16928 (79%) подготовлены в соответствии со стандартом GRI [8]. В российской практике доля отчётов в области устойчивого развития пока что ниже: всего из 510 нефинансовых отчётов 169 (33%) составляют отчёты в области устойчивого развития [18].

Невысокая распространённость нефинансовых отчётов в России связана, в том числе, с недостаточностью перехода России и российских компаний к социо-эколого-экономически устойчивому развитию. Для осуществления такого перехода необходимо построение системы соответствующих открытых институтов, в которой предприятия должны функционировать как звенья единого комплекса добывающей и перерабатывающей промышленности, а экономика должна быть диверсифицированной [32].

В международной практике существуют многочисленные системы индикаторов, которые, согласно классификации ООН, могут быть разделены на показатели, характеризующие одну из областей устойчивого развития: экологические, социальные, экономические, институциональные, а также интегральные показатели: эколого-экономические, эколого-социально-экономические, собственно экологические [33]. Однако следует обратить внимание на то, что подходы многочисленных организаций к построению системы данных индикаторов применимы, прежде всего, на макроэкономическом уровне, тогда как на уровне микроэкономики – отдельного предприятия – данная проблема остаётся недостаточно разработанной.

На основании стандарта GRI, с учётом российской системы отчётности и законодательства, Российский союз промышленников и предпринимателей (РСПП) разработал базовые индикаторы результативности, рекомендуемые для включения в нефинансовые отчёты. В рамках экономических индикаторов описываются подходы к управлению и даются показатели экономической результативности; в рамках экологических индикаторов раскрываются показатели использования материалов, воды и энергии, выбросов вредных веществ; социальные индикаторы охватывают занятость, взаимоотношения работников и руководства, образование и обучение, здоровье и безопасность, равные возможности.

К 2014 г. количество нефинансовых отчётов в России выросло до 510, подготовленных 144 компаниями. При этом среди лидеров находятся нефтяная и энергетическая отрасли. Среди компаний данных отраслей регулярно публикуют нефинансовые отчёты такие гиганты отрасли, как ОАО «Газпром», ОАО «ЛУКОЙЛ», ОАО «РусГидро», ГК «Росатом», ОАО «Россети». Долевое распределение нефинансовых отчётов в России в 2014 г. представлено на рис. 5.

Общая система нефинансовой отчётности может использоваться частично. На практике

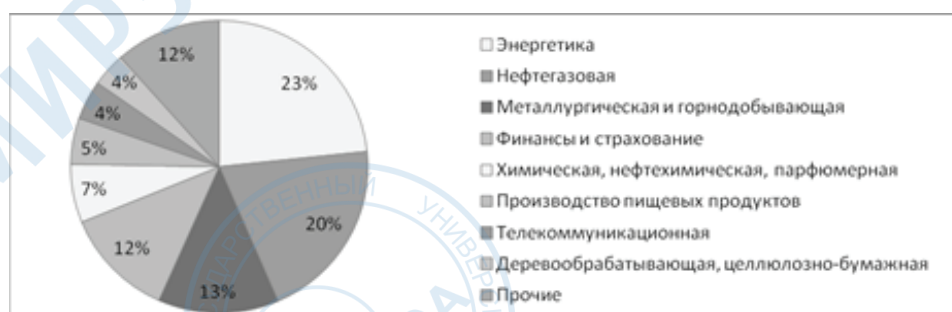


Рис. 5. Долевое распределение нефинансовых отчётов в России в 2014 г. по секторам экономики (составлено автором по данным Российского союза промышленников и предпринимателей [18]).

это предполагает разработку и публикацию отчётов в области корпоративной социальной ответственности, «зелёного» бизнеса, а также повышение открытости финансово-экономической деятельности для всех заинтересованных сторон.

Соблюдение принципов «зелёного» бизнеса основано на рациональном и экономном потреблении природных ресурсов, охране окружающей среды, внедрении ресурсосберегающих технологий и утилизации отходов. Общественность в зарубежных странах ожидает открытой информации от компаний о позитивных и негативных результатах их деятельности. Многие компании поддерживают контакты и консультируются с местным населением, экологическими группами и другими компаниями. Такой подход рассматривается как надлежащее управление компанией. Поэтому большинство компаний широко рекламирует свою экологическую политику, представляя ее как «миссию» в различных презентационных материалах. Среди крупнейших мировых промышленных предприятий распространена практика регулярной публикации экологических отчётов, в которых раскрываются следующие расчётные показатели:

- удельные выбросы сточных вод;
- удельные выбросы парниковых газов;
- удельные выбросы твёрдых отходов;
- доля отходов предприятия, подвергнутых вторичной очистке и переработке;
- доля работников предприятия, проживающих в районах с неблагоприятной экологической обстановкой;
- инвестиции в охрану окружающей среды;
- размер расходов на покрытие экологического ущерба предприятия окружающей среде.

Отметим, что такие страны, как Канада, Финляндия, Германия, Швеция, США, Япония и др. включили принципы устойчивого экологического развития в состав своих норм и правил. Поэтому компании из перечисленных стран являются лидерами в раскрытии информации не только об экологическом состоянии внутри производства, но и о его воздействии на окружающую среду. Среди них многие предприятия целлюлозно-бумажной, лесной, химической и химико-фармацевтической промышленности, сельского хозяйства и пищевой промышленности, индустрии туризма.

Существуют международные рынки и потребители продукции этих отраслей, которые придают большое значение устойчивому развитию. При ведении бизнеса они предпочитают тех контрагентов, которые на практике применяют принципы устойчивого развития и соответствующие им системы управления.

В ряде случаев корпоративная политика требует от деловых партнеров гарантировать применение принципов устойчивого развития. Например, автомобильные компании «Дженерал Моторс», «Форд» и «Тойота» работают только с поставщиками, которые имеют системы управления окружающей средой, соответствующие международному стандарту ISO 14001 [17]. В мировой практике большинство экологической отчётности публикуется по стандартам GRI, но небольшая доля компаний следует либо национальным, либо собственным стандартам устойчивого развития в области экологии. В российской практике экологические отчёты

пока являются наименее распространёнными: из 510 нефинансовых отчётов, опубликованных в 2014 г., только 49 отчётов экологические.

Структура нефинансовой отчётности в России в 2014 г. представлена на рис. 6.

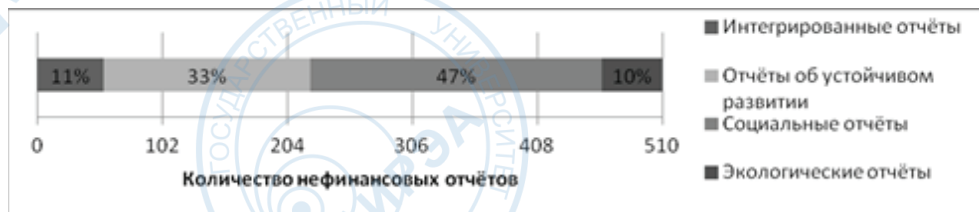


Рис. 6. Структура нефинансовой отчётности в России в 2014 г. [18].

Ответственность бизнеса при принятии управленческих решений перед работниками, потребителями и прочими представителями широкой общественности находит своё выражение через понятие корпоративной социальной ответственности (КСО), основные принципы которой заложены в социальных стандартах устойчивого развития. К XXI веку большинство крупных западных компаний сформировали собственные политики КСО, предусматривающие надлежащие трудовые и деловые практики, решение социально-экономических проблем, повышение качества жизни местных сообществ, соблюдение прав человека, недопущение коррупции и прочие вопросы социальной жизни окружающего населения. Финансовый сектор в ответ на внедрение принципов КСО сформировал практику ответственного финансирования. Ее особенностью является учет не только финансово-экономических показателей в процессе принятия решений о выделении финансирования, но также экологических и социальных факторов.

Для оценки результативности компаний в области КСО и устойчивого развития разработаны фондовые индексы, такие, как Dow Jones Sustainability Index (DJSI) и FTSE4GOOD [34]. В рамках КСО западные корпорации регулярно публикуют отчёты, в которых принято раскрывать следующую информацию:

- количество созданных высокопроизводительных рабочих мест;
- степень удовлетворённости работников трудом;
- расходы на охрану труда и социальное обслуживание работников;
- программы повышения квалификации и переобучения работников;
- уровень травматизма на производстве;
- социальные привилегии работникам предприятия;
- забота о работниках после выхода на пенсию.

К основным причинам, по которым концепция корпоративной социальной ответственности получила широкое распространение, можно отнести следующие:

1. Глобализация и связанное с ней обострение конкуренции. В условиях борьбы за источники финансирования преимущество получают те компании, которые имеют лучшую репутацию и следуют принципам устойчивого развития.

2. Растущие размеры и влияние компаний. Рост сопровождается усилением негативного воздействия на экологию и население, поэтому несоблюдение принципов в конечном итоге негативно скажется на самих корпорациях.

3. Внедрение инноваций. Гармонизация собственных интересов с интересами сообщества позволяет успешнее внедрять наиболее востребованные инновации на рынок. Таким образом, бизнес становится провайдером позитивных изменений и инноваций в рамках своей основной деятельности.

4. Усиление механизмов государственного регулирования. Некоторые принципы и стандарты управления устойчивым развитием становятся обязательными для исполнения и регулируются государством.

5. Конкуренция компаний за персонал. Лучшие практики управления социальной и экологической средой компаний позволяет им получить преимущество при поиске наиболее перспективных кадров.

6. Рост гражданской активности. Усиление влияния корпораций на сообщества обоюдно, поэтому если корпорации хотят работать на местных рынках, они вынуждены соблюдать местные правила и традиции ведения бизнеса. В результате компании формируют вокруг себя позитивную среду, способствующую эффективности ее бизнеса за счет понимания и поддержки со стороны широкого круга заинтересованных сторон.

7. Возрастающая роль нематериальных активов, на рост которых влияет уровень управления устойчивым развитием.

В ответ на стремление западных компаний повысить социальную ответственность, Российский союз промышленников и предпринимателей опубликовал Рекомендации по проведению самооценки организации деятельности компаний в соответствии с принципами социальной ответственности, на основе положений международного стандарта ISO 26000:2010, организованные в форме опросника по основным принципам и сферам деятельности в области социальных взаимоотношений с заинтересованными сторонами [20]. Кроме того, в рамках продвижения Всемирного саммита ООН по устойчивому развитию российские компании совместно с Российским союзом промышленников и предпринимателей разработали Социальную хартию российского бизнеса. Указанный документ содержит перечень положений, обязательных к исполнению членами Российского союза промышленников и предпринимателей в таких областях, как экономическая свобода и ответственность, партнёрство в бизнесе с акционерами, инвесторами, работниками, потребителями, контрагентами, ситуацию с соблюдением прав человека т.д. [22]. Данная система отчётности, наряду с Глобальной инициативой по отчётности (GRI), является важнейшим источником сведений об исходных показателях, на основе которых можно формировать перечень используемых для оценки управления устойчивым развитием расчётных показателей.

Экономические аспекты управления устойчивым развитием проявляются через повышение прозрачности деятельности корпораций, раскрытия информации об основных акционерах и результатах экономической деятельности. Раскрытие экономической информации может осуществляться как в рамках обязательной финансовой отчётности, так и в рамках подготовки комплексного отчёта об устойчивом развитии. В дальнейшем раскрываемая информация используется для оценки уровня управления устойчивым развитием крупнейших корпораций.

Финансовая отчётность является одной из наиболее жестко регулируемых сфер деятельности западных корпораций. Полное раскрытие информации об основных финансовых результатах в странах с развитыми биржами является обязательным условием для допуска компании к международным рынкам капиталов. Международная организация Transparency International регулярно публикует отчёты об уровне прозрачности крупнейших транснациональных корпораций по трём компонентам: раскрытие информации о недопущении коррупции, прозрачность организационных действий в корпорации и прозрачность экономической деятельности. По итогам 2014 г., наилучшие значения показали Eni (Нефтегазовая отрасль, Италия), Vodafone (Телекоммуникации, Великобритания) и Statoil (Нефтегазовая отрасль, Норвегия).

Между тем нужно учитывать, что крупнейшие корпорации все-таки неохотно раскрывают не обязательную к публичному обнародованию информацию, если этого не требует законодательство своих стран. Как свидетельствуют опубликованные данные, более 25% компаний отказываются раскрывать сведения о налоговых платежах; за последнее время ни одна китайская корпорация не раскрыла результаты своей финансовой деятельности. Крупнейшие американские корпорации сферы телекоммуникаций и торговли: Amazon, McDonald's, Apple, Google и IBM – находятся на дне списка публичности. При этом как и в статистике по нефинансовой отчётности, наблюдается прямая зависимость между уровнем государственного регулирования отраслей и необходимостью получения лицензии на деятельность, с одной стороны, и

уровнем раскрытия информации – с другой. Что касается российских компаний, то в рассматриваемом рейтинге лидирует акционерное общество «Роснефть» (Нефтегазовая отрасль) – 46 место. Кроме Роснефти, в списке присутствуют также акционерные общества «Газпром» и «Сбербанк» [35].

Таким образом, зарубежные практики управления устойчивым развитием сегодня все в большей мере ориентируются не столько на процесс достижения и раскрытия финансовых результатов, сколько на выполнение социо-экологических обязательств. Финансово-экономическая сфера остаётся закрытой сферой, регулируемой исключительно местным законодательством о раскрытии информации и требованием бирж по допуску акций компаний к торгам. В этой связи широкое распространение получают практики раскрытия нефинансовой отчётности GRI, ориентированные на освещение социо-экологической деятельности корпораций.

По итогам анализа зарубежной и российской практики управления устойчивым развитием, на основе раскрытия финансовой и нефинансовой информации, можно сформулировать ряд рекомендаций для повышения уровня информационной прозрачности предприятий:

1. Предприятиям необходимо самим разрабатывать перечень и определять объемы и способы раскрытия информации, которая может представляться публично. Она должна представляться в дополнение к той, которую предприятия раскрывают (или должны раскрывать) в обязательном порядке, в соответствии с законодательством стран, где предприятия функционируют. Несомненно, что в условиях жёсткой конкурентной борьбы полное раскрытие информации, скорее всего, ослабит компанию. Поэтому необходимо определить тот компромиссный минимум информации, который позволит всем экономическим субъектам-интересантам в результатах деятельности конкретных предприятий оценивать достигнутые ими результаты, а также предлагать свои рекомендации по их совершенствованию, однако без заметного ущерба для поддержания уровня конкурентоспособности.

По нашему мнению, необходимо начинать с минимума раскрытия информации, постепенно повышая как её количество, так и её качество. Одновременно следует уточнить, расширить и привести в соответствие с международной практикой, с принципами Организации Объединённых Наций, Организации экономического сотрудничества и развития, рекомендациями Международной организации по стандартизации, Российского союза промышленников и предпринимателей и прочих организаций сам перечень социо-эколого-экономических показателей.

2. Предприятиям следует переходить на международные стандарты финансовой отчётности и, если не отказываться от российских систем отчётности (что непозволительно с позиций соблюдения действующего законодательства), то хотя бы дублировать её в соответствии с международными стандартами финансовой отчётности. Такая практика повысит доверие инвесторов и, при прочих равных условиях, будет способствовать принятию ими положительных решений при выборе объектов инвестирования. При этом, если на начальном этапе можно разделить публикацию финансовых и нефинансовых данных (по желанию предприятия), то в будущем необходимо стремиться к публикации в рамках одного отчёта и группы отчётов как финансовой, так и нефинансовой информации на равных правах и основаниях.

3. Необходимо понимать, что ключевым аспектом в раскрытии информации, после достоверности, является срок её раскрытия. Если отчётность становится доступной только через несколько месяцев после самого факта события, то она становится бесполезной для принятия каких-либо решений. Поэтому следует уделить больше внимания кадрам, готовящим такую отчётность. Нужно снижать уровень их загруженности прочими вопросами при подготовке финансовых и нефинансовых отчётов, а также повышать уровень квалификации по грамотному представлению и обработке информации. Зачастую подготовка годовых отчётов акционерного общества или нефинансовой отчётности происходит в спешке из-за несвоевременного предоставления нужной информации соответствующими отделами. Нередко также наблюдается ситуация, когда несколько отчётов одновременно готовит одна и та же группа людей, из-за чего не получается сфокусироваться на одной проблеме. В таком случае следует более чётко

распределять обязанности между сотрудниками и наладить коммуникацию между ними.

4. На государственном уровне следует ужесточить ответственность и условия допуска к целевому финансированию для предприятий, которые не в полной мере раскрывают и, тем более, фальсифицируют данные в отчетности. Приток капиталов должен осуществляться на справедливой основе и приоритет отдаваться более эффективно работающим предприятиям, а не предприятиям, декларирующим такую эффективность.

Конечно, использование нефинансовой отчетности также декларирует эффективность и результаты работы предприятия в социо-эколого-экономических сферах. Однако возникающие при этом дополнительные возможности для проверки, регулирования и контроля информации (не только государственными органами, но и самыми разными экономическими субъектами-интересантами, включая общественные организации) будут стимулировать раскрытие только достоверной информации. К такому же результату должно привести и расширение практики заверения нефинансовых отчетов в соответствующих международных и национальных организациях, например, в Российском союзе промышленников и предпринимателей. Внешний аудит, особенно после внутреннего аудита нефинансовой отчетности, будет способствовать более объективному принятию управленческих и воздействующих извне решений по дальнейшим траекториям устойчивого развития предприятия.

5. Управление устойчивым развитием, как и системы финансовой и нефинансовой отчетности, в конечном итоге имеют цель повысить конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность предприятий. Однако при этом нельзя забывать про внешнюю среду. Среди потребителей и заинтересованных сторон необходимо воспитывать заинтересованность в получении достоверных данных. Если общественность слабо реагирует на несоблюдение предприятием стандартов информационной прозрачности, закрывает на это глаза, то и предприятия отвечают ей тем же, а именно, небрежностью в подготовке такой отчетности. Важен также и инвестиционный климат в стране. Если все усилия предприятия по привлечению инвестиций разбиваются о неблагоприятное мнение потенциальных инвесторов о стране, то «угасает» стремление соответствовать передовым практикам. Поэтому государству чрезвычайно важно контролировать инвестиционный климат в стране и оперативно реагировать на изменение положения страны в международных рейтингах, таких как Standart&Poor's, Fitch, Moody's и прочих.

6. В российской практике большее внимание при раскрытии нефинансовой информации следует уделить данным о структуре собственности и бенефициарных владельцах. Такая информация остаётся пока наиболее закрытой по сравнению с зарубежными предприятиями. Это не позволяет моментально определять реально управляющих предприятиями лиц, как и лиц, ответственных за те или иные результаты деятельности предприятий. Другой закрытой сферой в российском бизнесе является структура и вознаграждение членов советов директоров. В международной практике члены совета директоров не всегда представляют интересы только собственников. Они могут быть независимыми или представлять любых других субъектов-интересантов в результатах деятельности конкретных предприятий. Действующие ограничения на вхождение в состав членов совета директоров лиц, не представляющих интересы собственников, закрытость темы их вознаграждения, могут порождать самые разные неблагоприятные ситуации для конечных результатов управления устойчивым развитием самих предприятий и общества в целом; при отсутствии «прозрачности» они могут способствовать, например, лоббированию и принятию социо-эколого-экономических решений в интересах предприятий-конкурентов за счет самого примитивного подкупа отдельных членов советов директоров.

Литература:

1. Макаренко М.В., Костромин П.А. Стандарты как инструмент управления устойчивым развитием фармацевтического предприятия // Теория и практика общественного развития. 2013. №10. С. 332–334.

2. Yoshinori I. A new QMS Model for Sustainable Growth // EOQ 49 Congress. Topic E6, 2005. P. 1–14.
3. Социальная ответственность организации: требования. Женева: Международный комитет по корпоративной социальной ответственности, 2011. 36 с.
4. AccountAbility 1000 Assurance Standard. Accountability. NY: The Canadian Standards Association, 2008. 18 p.
5. ISO 20121:2012. Requirements with guidance for use. Event sustainability management systems. Geneva: International Standards Organisation, 2012. 42 p.
6. ISO 26000:2010. Руководство по социальной ответственности. ISO/FDIS 26000. Guidance on social responsibility. International Standards Organisation. Geneva: International Standards Organisation, 2010. 140 p.
7. Social Accountability International. Social accountability 8000. SAI. New York, 2008. 10 p. Online. <http://www.iqnet-certification.com/userfiles/>
8. Sustainability Reporting Guidelines. Global Reporting Initiative, New York, 2013. 94 p.
9. ISO. Selection and use of the ISO 9000 family of standards. ISO. Geneva: RobecoSAM AG, 2009. 16 p.
10. Национальный стандарт РФ. ГОСТ РФ 54598.1-2011. Руководство по обеспечению устойчивого развития. М.: Стандартиформ, 2012. 6 с.
11. ГОСТ ИСО 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартиформ, 2012. 32 с.
12. Нефинансовые отчеты компаний, работающих в России: практика развития социальной отчетности. Аналитический обзор. М.: РСПП, 2006. 108 с.
13. Quality management principles. ISO. Geneva: RobecoSAM AG, 2012. 12 p.
14. ГОСТ ИСО 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартиформ, 2012. 36 с.
15. Коряков А.Г. Механизмы реализации потенциала устойчивого развития предприятий химической промышленности. М.: Креативная экономика, 2012. 284 с.
16. Глобальный договор ООН [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.unglobalcompact.org/Languages/russian/ten_principles.html
17. Международный бизнес и устойчивое развитие: учебное пособие для предпринимателей. Сыктывкар: РГУ «НТЦ АГИКС РК», 2002. 71 с.
18. Национальный Регистр и Библиотека корпоративных нефинансовых отчетов Российский союз промышленников и предпринимателей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rspp.ru/simplepage/157>
19. Ответственная деловая практика в зеркале отчетности. Аналитический обзор корпоративных нефинансовых отчетов: 2012-2014 годы выпуска. М.: РСПП, 2015. 136 с.
20. Рекомендации для компаний по проведению самооценки организации деятельности компании в соответствии с принципами социальной ответственности на основе положений международного стандарта ISO 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности». М.: РСПП. 2011, 44 с.
21. Руководство по отчетности в области устойчивого развития: версия G4. Женева: Эрнст энд Янг, 2013. 4 с.
22. Социальная хартия российского Бизнеса. М.: РСПП, 2008. 21 с.
23. Фоменко, Г.А., Фоменко М.А. Интеграция публичных экологических докладов в управление территориями. М.: Институт устойчивого развития Общественной палаты Российской Федерации (Центр экологической политики России), 2013. 186 с.
24. BS 8900:2006 Guidance for managing sustainable development Specification with guidance for use BSI (British Standards Institution) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://shop.bsigroup.com/Browse-By-Subject/Environmental-Management-and-Sustainability/Sustainability/>
25. BS 8901:2009 Sustainable events management system - Specification with guidance for use BSI (British Standards Institution) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://shop.bsigroup.com/Browse-By-Subject/Environmental-Management-and-Sustainability/Sustainability/>

com/Browse-By-Subject/Environmental-Management-and Sustainability/Sustainability/

26. Scott T.D., Taka I. Ethics Compliance Management System Standard 2000. A Governance Document for the Implementation of the Ethics Compliance Standard. New York: The Canadian Standards Association (Reitaku University, Business Ethics and Compliance Research Center), 2001. 115 p.

27. SD 21000:2005 Sustainable development - Corporate Social Responsibility - Guide for the taking into account of the stakes of sustainable development. Bianchi EOQ Congress Topic C5 Corporate Sustainable Development EFQM / France AFAQ-AFNOR, 2012. 7 p.

28. The KPMG Survey of Corporate responsibility reporting. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kpmg.com/Global/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/corporate-responsibility/Documents/corporate-responsibility-reporting-survey-2013.pdf>

29. Тумин В.М. Устойчивое инновационное развитие промышленного предприятия. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 137 с.

30. Антонов Г.Д., Иванова О.П., Тумин В.М. Управление конкурентоспособностью организации. М.: ИНФРА-М, 2015. 300 с.

31. Васильев М.Г., Тумин В.М., Коряков А.Г. Устойчивое развитие химических предприятий. М.: ИД «НАУКОМ», 2012. 348 с.

32. Сухорукова С.М., Сухоруков П.В., Тумин В.М. Экологический менеджмент в условиях глобализации экономики. М.: КолосС, 2009. 216 с.

33. Бобылёв С.Н., Минаков В.С., Соловьёва С.В., Третьяков В.В. Эколого-экономический индекс регионов РФ. Методика и показатели расчёта. М.: WWF России, РИА Новости, 2012. 147 с.

34. Корпоративная социальная ответственность. Новая философия бизнеса: учебное пособие. М.: ВЭБ. 2011. 56 с.

35. Transparency in corporate reporting. Assessing the World's Largest Companies. Berlin: Transparency International, 2014. 36 p.

Правила для авторов 2016

Рецензируемое периодическое сетевое научное издание Российский технологический журнал выходит 6 раз в год и публикует оригинальные экспериментальные и теоретические работы в виде полных статей, кратких сообщений, а также авторские обзоры и прогнозно-аналитические статьи по следующим разделам:

1. Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности.
2. Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования неразрушающего контроля.
3. Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы.
4. Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния.
5. Аналитическое приборостроение и технологии.
6. Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.
7. Мировоззренческие основы технологии и общества.

Материалы могут представляться на русском или английском языках и издаются на языке оригинала. Все статьи принимаются к печати на основании результатов их рецензирования. Статьи, не соответствующие профилю журнала или не соответствующие его требованиям, отклоняются редколлегией без рецензирования.

Статья представляется в виде файла формата MS-Word.

Рекомендуемый объем статьи – 10-15 страниц формата А4, обзора – 30-35 страниц формата А4, набранных шрифтом 12 Times New Roman через 1.5 интервала (вместе с таблицами и списком литературы).

В редакцию необходимо также представить:

- экспертное заключение;
- сопроводительное письмо от организации, в которой выполнена работа;
- авторы публикаций из Московского технологического университета должны представить выписку из протокола заседания кафедры с рекомендацией к опубликованию;
- заполненный договор о передаче права на использование произведения (два оригинальных экземпляра).

Текст необходимо набирать с полуторным межстрочным интервалом. Для основного текста шрифт 12 Times New Roman, поля по 2 см со всех сторон. Документ должен быть подготовлен в программе Microsoft Word (не выше Word 2003) и сохранен в формате doc или rtf. Нумерация страниц сквозная.

Первая страница статьи должна содержать (выравнивание по левому краю, шрифт Times New Roman):

- УДК (шрифт 11);
- название статьи (шрифт 14, полужирный, прописными буквами);
- инициалы, фамилии авторов (шрифт 14, полужирный); с указанием ученой степени, должности каждого автора (шрифт 12, полужирный);
- полное наименование организации, где работают авторы (шрифт 11, курсив), с указанием города, почтового индекса и страны. Если организаций две и более, необходимо цифровыми надстрочными индексами связать название учреждения и фамилии авторов, в нем работающих;
- e-mail автора, ведущего переписку (шрифт 10, курсив) (@Автор для переписки, e-mail);
- аннотацию (шрифт 9, курсив), которая должна адекватно представлять содержание и результаты статьи;
- ключевые слова (от 5 до 8 слов или сочетаний), которые характеризуют содержание статьи; ключевые слова приводятся в именительном падеже и печатаются строчными буквами, через запятые (шрифт 9, курсив).

Затем необходимо поместить на английском языке одним блоком (форматирование то же, что и в русском варианте):

- название статьи;
- инициалы и фамилии авторов;
- название организаций с указанием города, почтового индекса и страны;
- e-mail автора для переписки (@Corresponding author e-mail).
- расширенную аннотацию (объемом от 100 до 250 слов), (шрифт 9, Arial, курсив), которая должна выполнять функцию не зависящего от основного текста публикации источника информации и поэтому должна исчерпывающе отражать содержание работы и не дублировать аннотацию на русском языке;
- ключевые слова (Keywords).

Авторам статей необходимо придерживаться следующей структуры текста статьи:

- краткое изложение состояния рассматриваемого вопроса и постановка задачи, решаемой в статье;
- метод решения задачи и принятые допущения;
- основное содержание статьи (например: описание сущности процессов и явлений; доказательства представленных в статье положений, исходные и конечные математические выражения; математические выкладки и преобразования; эксперименты и расчеты, примеры, иллюстрации);
- обсуждение полученных результатов и сопоставление с ранее известными;
- выводы и рекомендации.

Список литературы помещается в конце статьи и оформляется в соответствии с нижеприведенными требованиями. Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания в тексте, порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки. Список литературы должен быть сформирован вручную, без использования функции «Список».

В ссылках на цитируемую литературу следует указывать для журнала: фамилии авторов, инициалы, название журнала, год, том, номер, страницы от и до; для книги: фамилии авторов, инициалы, название, место издания (город), название издательства, год, общее число страниц; не рекомендуется ссылаться на авторефераты и диссертации.

Пример оформления ссылок:

1. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901–914.
2. Cosijns S.J.A.G. Displacement laser interferometry with sub-nanometer uncertainty. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. 189 p.

На отдельной странице необходимо указать фамилию, имя, отчество, контактный телефон автора, с которым следует вести переговоры по вопросу публикации.

При выборе единиц измерения рекомендуется придерживаться Международной системы единиц СИ.

Используемые в статье сокращения следует расшифровывать при первом упоминании в тексте (за исключением общепринятых сокращений).

Не допускается дублирование данных в тексте, таблицах и рисунках.

Все формулы набираются во встроенном в Microsoft Office Word редакторе формул; выравнивание по левому краю страницы. Номера формул проставляются справа.

Таблицы должны иметь заголовки и порядковые номера, на которые даются ссылки в тексте. В таблицы включаются только необходимые цифровые данные. Таблица не должна выходить за рамки рабочего поля.

Рисунки размещаются в рамках рабочего поля непосредственно в тексте статьи исходя из логики изложения. Допускается использование рисунков в форматах JPEG, PNG, WMF, EPS, TIF.

Используемое в тексте сканированное изображение должно иметь разрешение не менее 300 точек на дюйм.

Правила для авторов

Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение. Рисунки могут включать краткие цифровые или буквенные обозначения (нумеруются слева направо или по часовой стрелке), набранные соответствующим остальному тексту шрифтом (размер не менее 9 и не более 11). При необходимости расшифровки деталей на самом рисунке дается их нумерация, все пояснения, относящиеся к деталям, помещаются под рисунком, в подрисуночной подписи. Все рисунки должны быть пронумерованы, в тексте обязательно должна быть ссылка на рисунок.

Все статьи, поступившие в редакцию, проходят экспертизу членов редколлегии и направляются на рецензирование. Выбор рецензента является прерогативой редакции (фамилии рецензентов авторам не сообщаются). Статьи, принятые к публикации, тщательно редактируются. Небольшие исправления стилистического, номенклатурного или формального характера вносятся в статью без согласования с авторами. Если в результате рецензирования или редактирования необходимы более серьезные исправления, статья отсылается авторам на доработку. Авторам следует внести в текст все необходимые с их точки зрения исправления, а также прокомментировать все замечания в ответном письме в редакцию. Доработанная рукопись должна быть возвращена в редакцию в максимально короткий срок (не более 10 рабочих дней) вместе с предыдущим вариантом статьи и электронной версией окончательного варианта.

Представление статьи для публикации подразумевает согласие авторов с настоящими правилами.

Адрес редакции: 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7(495)246-05-55 (доб. 2-88); E-mail: seredina@mirea.ru

Адрес доступа: www.mirea.ru