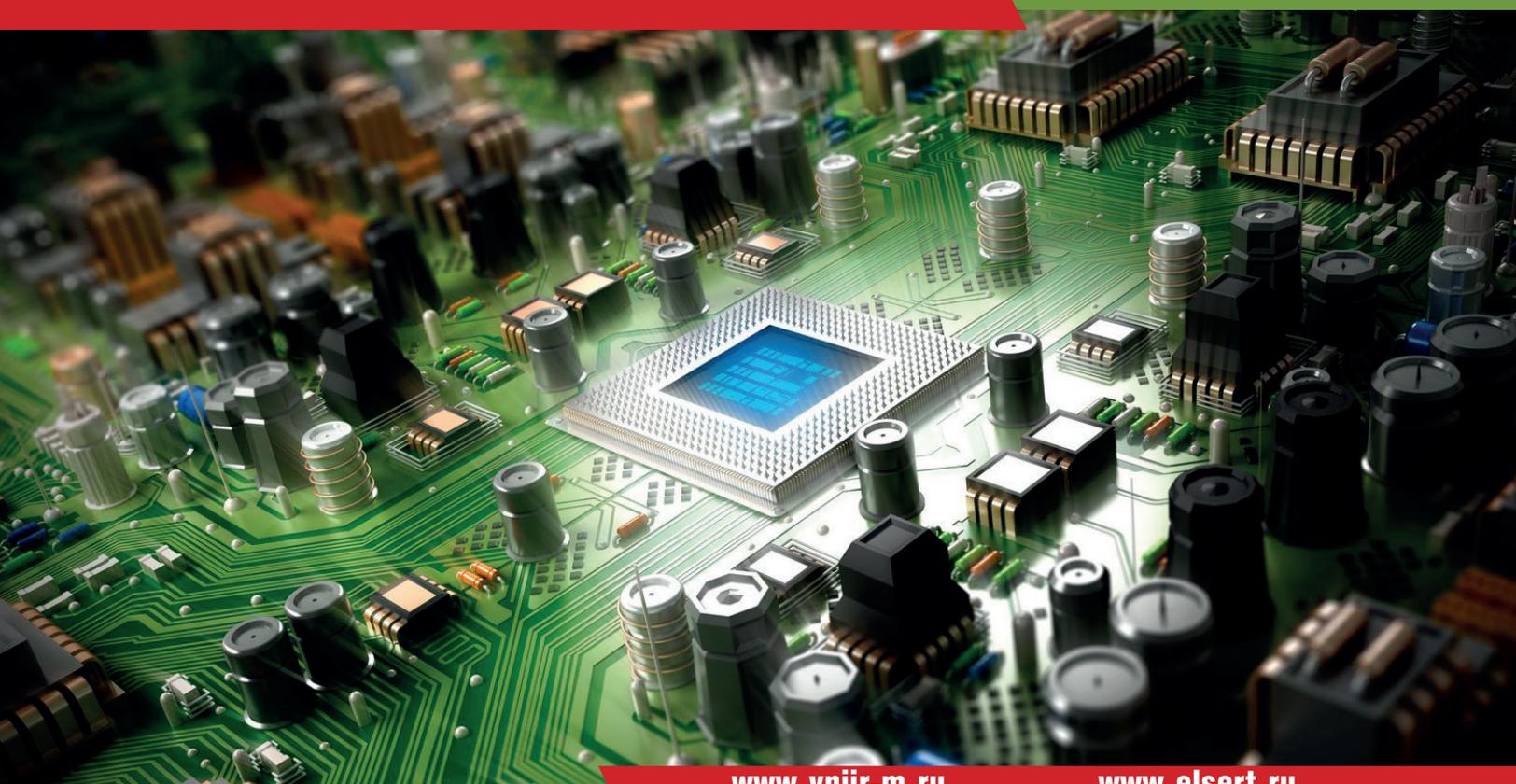


# 3 (11) | РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ: 2023 | ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЯ



[www.vniir-m.ru](http://www.vniir-m.ru)

[www.elsert.ru](http://www.elsert.ru)

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ  
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
КАЧЕСТВО И НАДЁЖНОСТЬ  
ЭКОНОМИКА ОТРАСЛИ  
СЕРТИФИКАЦИЯ, АТТЕСТАЦИЯ, КВАЛИФИКАЦИЯ

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ «АРМИЯ-2023»  
КРУГЛЫЙ СТОЛ РОССИЙСКОГО ИНСТИТУТА  
СТАНДАРТИЗАЦИИ «ФОРМИРОВАНИЕ ФОНДА ДСОП,  
РАБОТА ГОЛОВНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ  
ОБОРОННОЙ ПРОДУКЦИИ В ПЕРЕХОДНЫЙ ПЕРИОД.  
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ»**

16 августа 2023 года проведен Круглый стол по теме «Формирование фонда ДСОП, работа головных организаций по стандартизации оборонной продукции в переходный период. Актуальные вопросы и пути решения». Модератором Круглого стола выступило Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский институт стандартизации» (ФГБУ «Институт стандартизации»).

В работе Круглого стола приняли участие более 42 представителей (руководители и специалисты) от более, чем 20 организаций, принимающих участие в деятельности по стандартизации оборонной продукции.

От ФГБУ «ВНИИР» в мероприятии приняли участие заместитель директора Центра стандартизации и испытаний Булгаков О.Ю. и начальник отдела стандартизации Центра стандартизации и испытаний Колядин А.И.

С вступительным словом выступили:

– Генеральный директор ФГБУ «Институт стандартизации» Миронов Денис Евгеньевич;

– Начальник отдела технического регулирования Департамента оборонной промышленности Правительства Российской Федерации Климович Геннадий Анатольевич.

С докладами, проиллюстрированными слайдами, выступили:

– Генеральный директор ФГБУ «Институт стандартизации» Миронов Денис Евгеньевич;

– Директор Научно-исследовательского института стандартизации и сертификации «Лот» Филиппов Павел Васильевич;

– Руководитель Центра по стандартизации авиационной промышленности ФГУП «ВНИИ «Центр» Манташева Янина Александровна;

– Генеральный директор АО «РНИИ «Электронстандарт» Левин Роман Григорьевич;

– Советник генерального директора ФГБУ «Институт стандартизации» Будкин Юрий Валерьевич.

В своих выступлениях докладчики:

– проинформировали о текущем состоянии и плановых сроках завершения процедуры передачи от головных организаций по стандартизации оборонной продукции (далее - ГОСОП) подлинников документов по стандартизации оборонной продукции (далее - ДСОП) в ФГБУ «Институт стандартизации»;

– выразили мнение, что проводить одновременно процедуры передачи подлинников ДСОП и оценку актуальности и применимости ДСОП организациями оборонной промышленности нежелательно;

– пришли к мнению, что оценка актуальности и применимости ДСОП и исключение ДСОП из Сводного перечня должна проводиться после полной передачи подлинников ДСОП в ФГБУ «Институт стандартизации»;

– сделали вывод, что величины ущерба от возможных ошибок при этом могут быть значительны, и выражаться (в первую очередь) в потере времени при организации производства и ремонтных работ оборонной продукции;



– обратили внимание на то, что пока нет полной ясности по вопросу разделения функций в работе по стандартизации оборонной продукции между ГОСОП и ФГБУ «Институт стандартизации» после завершения процедуры передачи им подлинников ДСОП;

– отметили сложность и трудоемкость проведения экспертизы актуальности и применимости ДСОП;

– поделились опытом по актуализации ДСОП с примерами востребованности ДСОП на изделия, производство которых давно прекращено и, казалось очевидным, что эти ДСОП необходимо исключать из Сводного перечня;

– отметили, что практика показала, что после начала Специальной военной операции на Украине многие, ранее вроде бы не используемые ДСОП стали востребованы предприятиями, занимающимися ремонтными и восстановительными работами;

– отметили, что были случаи восстановления производства изделий ЭКБ, после исключения ДСОП на эти изделия из Сводного перечня;

– поделились опытом по стандартизации аддитивных производственных технологий в оборонной продукции;

– обратили внимание, что есть достаточно много вопросов, требующих коллективного обсуждения специалистами по стандартизации оборонной продукции. Например, не понятно, кто на законных основаниях уполномочен давать разъяснения по противоречиям и двоякому толкованию некоторых положений ДСОП, которые (к сожалению) имеют место быть.

Завершая работу Круглого стола, Геннадий Анатольевич Климович отметил полезность проведенного мероприятия и выразил мнение, что необходимо чаще проводить подобный обмен опытом и мнениями по вопросам стандартизации оборонной продукции.

**Выводы:**

– мероприятие Круглый стол «Формирование фонда ДСОП, работа головных организаций по стандартизации оборонной продукции в переходный период. Актуальные вопросы и пути решения» способствовало постановке, обсуждению и обозначению путей решения проблемных вопросов в части стандартизации оборонной продукции;

– отказы в актуализации и исключение ДСОП из Сводного перечня должны быть серьезно обоснованы, в противном случае это может привести к нанесению существенного ущерба, который будет выражаться (в первую очередь) в потере времени при организации производства и ремонтных работ оборонной продукции.

**РО Пир 3 (11)/2023 (основан в 2021 году)**

Зарегистрирован в федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-83479 от 15 июня 2022 г. Материалы журнала размещаются на сайте научной электронной библиотеки и включаются в национальную информационно-аналитическую систему РИНЦ.

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

В.В. Шпак, кандидат экономических наук  
Г.Я. Красников, Президент РАН  
И.С. Иванов, генеральный директор ФГБУ «ВНИИР»  
С.И. Боков, доктор экономических наук  
А.В. Брыкин, доктор экономических наук  
В.Л. Гладышевский, доктор экономических наук  
Н.В. Завьялов, член-корреспондент РАН  
В.М. Исаев, доктор технических наук  
А.С. Сигов, академик РАН  
В.Б. Стешенко, кандидат технических наук  
А.А. Рахманов, доктор технических наук  
В.А. Телец, доктор технических наук  
А.В. Трусов, доктор технических наук

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:**

О.Ю. Булгаков, заслуженный работник связи РФ, кандидат военных наук

**Заместитель главного редактора:**

С.Б. Подъяпольский, кандидат технических наук

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

А.С. Афанасьев, кандидат технических наук  
В.В. Быканов, кандидат технических наук  
Л.П. Дюжакова, заместитель ГД ФГБУ «ВНИИР»  
П.С. Желтухин, доктор технических наук  
И.Н. Кабанов, доктор технических наук  
Р.Г. Левин, кандидат физико-математических наук  
С.С. Милосердов, кандидат технических наук  
Д.В. Орехов, кандидат экономических наук  
А.Г. Подольский, доктор экономических наук  
Д.А. Руденко, кандидат военных наук  
Ю.В. Рубцов, генеральный директор АО ЦКБ «Дейтон»  
В.А. Трусов, доктор технических наук  
Л.А. Фёдорова, академик Академии проблем качества  
В.Н. Храменков, доктор технических наук

**РЕДАКЦИЯ:**

В.В. Малышева, графический дизайнер  
В.А. Сахаров, редактор-корректор  
Ю.А. Зайцева, редактор-корректор  
О.Е. Николаева, редактор-корректор

Адрес редакции: Колпакова ул., д. 2а,  
г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141002  
Тел/факс: +7 (495) 586-17-21 / +7 (495) 588-69-61

Отпечатано:

Юридический адрес: Колпакова ул., д. 2а,  
г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141002  
Тел/факс: +7 (495) 586-17-21 / +7 (495) 588-69-61

Сдано в набор 01.09.2023 г.

Подписано к печати 30.09.2023 г.

Тираж 350 экз.

Редакция не несёт ответственности за содержание авторских материалов и достоверности сведений в рекламе.

Фотография на обложке – открытый источник сети Интернет.

Совместное учреждение и издание федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоэлектроники» (ФГБУ «ВНИИР») и автономной некоммерческой организации «Центр сертификации, обучения и консалтинга «Электронсертифика» (АНО «Электронсертифика»). Журнал выпускается при содействии Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга РФ и Российского технологического университета – МИРЭА.

Булгаков О.Ю., Колядин А.И.

**Международный военно-технический форум «АРМИЯ-2023». Круглый стол Российского института стандартизации «Формирование фонда ДСОП, работа головных организаций по стандартизации оборонной продукции в переходный период. Актуальные вопросы и пути решения»**

**СОДЕРЖАНИЕ****РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ**

Башкатов А.С., Корнилов С.В., Морозова О.Н., Певчих К.Э., Светиков В.В.

Состояние и потенциал развития фотонных интегральных схем на фосфиде индия, ниобате лития и кремнии ..... 2

Митин Е.В., Семутенко Ю.Н., Гридасов Л.В.

Отказы МОП-транзисторов при облучении тяжелыми ионами ..... 11

Быканов В.В., Есакова М.М., Тупицина А.В., Кремнева А.В., Косач А.С.

Вопросы метрологического обеспечения нестандартного испытательного оборудования (испытательных стендов) в процессе разработки на предприятиях радиоэлектронной промышленности ..... 16

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Воронцов В.Л., Давыдов И.А.

Концепция развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения ..... 24

**КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ**

Рубцов Ю.В.

Результаты исследования и разработки подходов к применению электромагнитной левитационной направляющей для использования в компьютерных системах визуальной оценки качества изделий микроэлектроники ..... 32

**ЭКОНОМИКА ОТРАСЛИ**

Боков С.И., Пестун У.А.

Подход к моделированию экономических процессов .... 38

**СОСТОЯНИЕ И ПОТЕНЦИАЛ РАЗВИТИЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА ФОСФИДЕ ИНДИЯ,  
НИОБАТЕ ЛИТИЯ И КРЕМНИИ**

**STATE AND DEVELOPMENT POTENTIAL OF PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS BASED ON INDIUM PHOSPHIDE,  
LITHIUM AND SILICON NIOBATE**

**Башкатов А.С., Корнилов С.В.**, к. т. н., доцент, **Морозова О.Н.**, ФГБУ «ВНИИР», +7 (495) 586-17-21, bashkatov@vniir-m.ru, kornilov@vniir-m.ru; **Певчих К.Э., Светиков В.В.**, к. ф-м. н., АО «ЗНТЦ»; **Bashkatov A.S., Kornilov S.V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Morozova O.N.**, FSBI "VNIIR", +7 (495) 586-17-21, bashkatov@vniir-m.ru, kornilov@vniir-m.ru; **Pevchikh K.E., Svetikov V.V.**, Ph.D., JSC "ZNTC"

**Аннотация.** Серия статей посвящена описанию области применений фотонных интегральных схем, технологий их изготовления и потенциала развития. Будут описаны специфика основных технологий, их преимущества и недостатки, основные тренды и наиболее успешные примеры применения.

**Annotation.** A series of articles is devoted to the description of the field of applications of photonic integrated circuits (PIC), their manufacturing technologies and development potential. The specifics of the main technologies, their advantages and disadvantages, the main trends and the most successful application examples will be described.

**Ключевые слова:** фотонные интегральные схемы, кремний на изоляторе, система на кристалле.

**Keywords:** photonic integrated circuits, silicon on insulator, System on a Chip (SoC).

### Введение

Фотонные интегральные схемы (далее – ФИС) играют ключевую роль в оптических системах связи, оптических вычислениях и оптических нейронных сетях, благодаря их большой скорости и объему передаваемой информации. Большинство интегральных схем микроволновой фотоники базируются на трех основных платформах: фосфид индия (далее – InP), ниобат лития (далее – LN, LiNbO<sub>3</sub>) и кремний (далее – Si). Первая является самой сложной, но самой комплексной по функциональным возможностям, вторая – примером узкого, но очень эффективного решения ряда актуальных задач, кремниевая платформа – самая массовая. Технологий немного, и они достаточно четко разделены по нишам применения, но всегда «будут покушаться на приграничные территории». У каждого из этих материалов есть свои преимущества и недостатки, в то же время за последние несколько лет были продемонстрированы заметные результаты.

Основными областями применения ФИС на сегодняшний день являются телекоммуникации, оптико-электронные системы космического, воздушного, морского и наземного базирования, робототехника, медицинское и научное оборудование, в перспективе – системы контроля состояния сложных инженерных объектов, беспилотный транспорт, квантовые вычисления.

Технология фотонных интегральных схем продолжает развиваться и расширяться в направлении повышения функциональности и производительности. Технологию изготовления ФИС по способу интеграции элементов, изготовленных по разным технологиям, можно разделить на две группы: гибридная интеграция – сборка из отдельных законченных компонентов, и гетерогенная (монокристаллическая)



Башкатов А.С.



Корнилов С.В.



Морозова О.Н.



Певчих К.Э.



Светиков В.В.

интеграция. Гетерогенная интеграция определяется как интеграция элементов, изготовленных на разных материальных платформах, в монокристаллические компоненты более высокого уровня для повышения функциональности и улучшения общих эксплуатационных характеристик.

### Основная часть

#### Фотонные интегральные схемы на основе фосфида индия

Фосфид индия является наиболее развитой и высокопроизводительной платформой для ФИС, но наиболее затратной по себестоимости. InP-технология обеспечивает

монолитную интеграцию всех необходимых активных компонентов (лазеры, полупроводниковые оптические усилители, модуляторы/преобразователи импульсов) и пассивных компонентов (волноводные соединители, фильтры, разветвители), предоставляя возможность реализации сложных современных схем оптических передатчиков и приемников на одном кристалле.

На InP возможно реализовать лазеры, излучающие в телекоммуникационных диапазонах 1260 – 1625 нм. Кроме того, с помощью этой материальной системы могут быть реализованы высокоэффективные модуляторы и фотодетекторы, поэтому она представляет собой оптимальную платформу ФИС с точки зрения снижения стоимости, размера, массы и энергопотребление фотонной системы. Последние исследования в области разработки фотонных интегральных схем показали перспективы по уменьшению

размера, массы и мощности по сравнению с дискретными (гибридными) решениями, улучшению надежности и производительности.

ФИС на InP изначально были разработаны, в первую очередь, для телекоммуникаций и в значительной степени достигли развития, благодаря устойчивому росту этой отрасли. Эта технология применялась и в других сферах с использованием множества готовых коммерческих компонентов. Примерами являются микроволновая фотоника, лазерная связь и зондирование в открытом космосе.

В частности, для космической оптической связи были разработаны ФИС InP на основе эпитаксиальной структуры со смещенной квантовой ямой и лазером с распределенным брэгговским отражателем с дискретизированной решеткой (далее – SG-DBR) [1]. Компонентная схема многосекционного SG-DBR-лазера представлена на рис. 1.

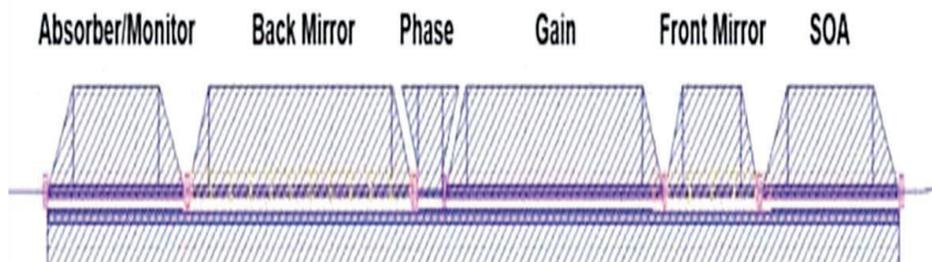


Рис. 1. Схема многосекционного SG-DBR-лазера

Многие InP-лазеры основаны на активных областях с напряженными множественными квантовыми ямами. Доступные типы лазеров включают распределенную обратную связь и несколько вариантов распределенного брэгговского отражателя (далее – DBR). Одним из наиболее распространенных лазеров с широким диапазоном перестройки является лазер с распределенным брэгговским отражателем с дискретизированной решеткой. Для эффективной реализации такого многосекционного SG-DBR-лазера требуется метод активно-пассивного интегрирования для выборочного формирования областей для усиления и областей, ко-

торые оптически прозрачны для длины волны лазерного излучения.

Помимо лазерной связи в свободном пространстве, ФИС на InP могут обеспечить ряд других новых приложений, включая лидары, микроволновую фотонику и дистанционное зондирование. Пример ФИС приемопередатчика на InP для лидарной системы управления лучом показан на рис. 2. Эта фотонная интегральная схема состоит из SG-DBR-лазера с широким диапазоном перестройки, частотного дискриминатора для синхронизации/стабилизации длины волны и сбалансированного приемника для когерентного обнаружения [1].

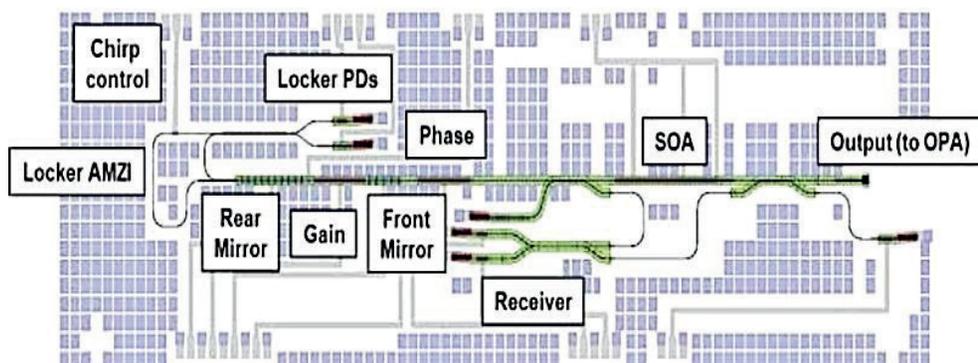


Рис. 2. ФИС приемопередатчика на InP для управления лучом лидара

Технологические возможности InP достигаются за счет монолитной интеграции, а затем успешной демонстрацией широкого спектра фотонных функций на одном кристал-

ле. Монолитные ФИС, изготовленные в процессе эпитаксиального роста, представляются более перспективными, поскольку имеют более высокую плотность компоновки,

облегчают взаимодействие между различными интегральными элементами для оптимизации эксплуатационных характеристик и надежности системы.

В 2004 году в корпорации Infinera California, США R. Nagarajan и соавторы создали первую полностью интегрированную многоканальную оптическую систему на кристалле (далее – SOC) со скоростью передачи и приема 100 Гбит/с [2]. С тех пор каждое поколение коммерческих ФИС передатчиков и приемников на разных материальных платформах на основе SOC имело более высокую как функциональность, так и плотность компоновки. В 2016 году в корпорации Infinera California, США были разработаны и переданы в производство ФИС передатчика и приемника со скоростью 1,2 Тб/с (6 каналов × 200 Гб/с на канал) с независимыми лазерами широкого диапазона перестройки на канал в расширенном C-диапазоне [3]. Эти ФИС были первыми коммерческими полностью интегрированными когерентными передатчиками и приемниками со встроенными лазерами широкого диапазона перестройки и первыми коммерческими многоканальными ФИС, работающими на 16 QAM. Успешная демонстрация DWDM-ФИС (плотное мультиплексирование с разделением по длине волны) на основе InP с высоким количеством каналов и пропускной способностью до 1 Тб/с на длину волны демонстрирует технологические возможности, которые могут одновременно обеспечивать как оптимальную производительность, так и высокий выход годных изделий. Эти факторы являются важными требованиями для разработки конструкций фаундри-производства. Важным для коммерческого успеха любой интегральной схемы является и то, что экономическая выгода, получаемая от интеграции компонентов, должна превышать стоимость самой интеграции. Для реализации технологичных ФИС с высокой плотностью компоновки монолитно интегрированных функций и каналов необходимо выполнить как минимум два требования: достаточные рабочие характеристики и выход годных пластин. Выход годных пластин на каждом этапе является ключевым показателем рентабельности производства, требующим строгой методологии управления процессом производства и методологии анализа. Фотонные интегральные схемы, разработанные для передатчиков и приемников с использованием усовершенствованной когерентной модуляции, представляют идеальную платформу для фаундри-производства для нужд разнообразных приложений фотонной интеграции. Необходимо разработка нескольких поколений коммерческих конструкций ФИС системы на кристалле и производственного процесса для развития фаундри-производства, предлагающего библиотеки для разработки технологических процессов (далее – PDK), которые учитывают требования к встроенным и радиочастотным тестам, корпусированию, а также совместимость с приводной и управляющей электроникой. Интеграция ФИС на InP и КМОП-электроники на кристалле – еще одна важная область исследований, которая обещает предоставить высокопроизводительную систему.

Помимо разработки высокопроизводительных приемопередатчиков для телекоммуникаций, реализация сложных фотонных систем на основе ФИС на InP, может

обеспечить множество реальных приложений в таких областях, как зондирование, визуализация и высокоскоростная обработка сигналов. Несмотря на значительное продвижение технологии ФИС на InP, необходимы дальнейшие усилия для уменьшения сложности их сборки. Поскольку ФИС на InP часто сопрягаются с электроникой и другими интегрированными оптическими и микрооптическими системами, требуется гибкая упаковочная технология, способная обеспечить не только низкие затраты и потребности в больших объемах, но и высокопроизводительные компоненты.

#### **Фотонные интегральные схемы на основе ниобата лития**

В настоящее время ФИС достигли уровня развития промышленной платформы, позволяющей интегрировать активные и пассивные оптические компоненты на одном кристалле масштабируемым способом. Одной из оригинальных платформ ФИС, обеспечивающих связь по оптоволокну, является ниобат лития. Недавно тонкопленочный ниобат лития на изоляторе (далее – LNOI) стал коммерчески доступным материалом. Пластины LNOI обычно изготавливаются с помощью процесса, называемого «ионная имплантация», который аналогичен процессу, используемому для изготовления стандартных пластин «кремния на изоляторе» (далее – КНИ). Технология изготовления пластин ионной имплантацией масштабируется до больших размеров пластин, как показывает изготовление пластин КНИ диаметром до 300 мм такими компаниями, как «Soitec». Это указывает на то, что размер пластины LNOI, как ожидается, будет увеличиваться по мере развития процессов изготовления и увеличения спроса.

LNOI становится одной из наиболее перспективных платформ для интегральной фотоники, благодаря высокому контрасту показателя преломления и превосходным свойствам материала LiNbO<sub>3</sub>, таким как широкополосная прозрачность от видимого до средневолнового ИК-диапазона, высокие электрооптические, пьезоэлектрические коэффициенты и искажения второго порядка. Быстро развивающиеся методы микро- и наноструктурирования на LNOI позволили создать различные структуры, устройства, системы для различных применений.

Анализ доступных к изучению зарубежных публикаций показывает высокий интерес исследователей к тематике ФИС. Thomson D. и соавторы из Исследовательского центра оптоэлектроники Великобритании сообщают, что за последнее время разработаны оптические волноводы с низкими потерями, лазеры, модуляторы, детекторы на таких материалах, как кремний [4] и достигнута монолитная интеграция многофункциональных устройств. Jos J.G.M. van der Tol и соавторы из Технологического университета Эйндховена (Нидерланды) представили новую платформу фотонной интеграции, мембраны InP на кремниевой платформе, которая обещает добавление высокопроизводительного фотонного слоя InP к стандартным электронным чипам КМОП [5]. Преимущества этих интегрированных фотонных чипов заключаются в меньших габаритах, высокой степени интеграции, низком энергопотреблении и высоком коэффи-

циенте усиления за счет уменьшения потерь в канале связи, позволяя выполнять более сложные функции. Однако такие материалы, как кремний и фосфид индия, имеют некоторые собственные недостатки, из-за которых вышеупомянутые результаты исследований не могут соответствовать требованиям для интеграции микроволновых фотонных систем. Cheng Wang и соавторы из Школы инженерии и прикладных наук Джона А. Полсона, Гарвардский университет (США) продемонстрировали модуляторы на ниобате лития микрометрового масштаба, отличающиеся широкой полосой пропускания, отличной линейностью, низким напряжением и хорошей температурной стабильностью в отличие от электрооптических модуляторов на основе материалов «кремний на изоляторе» и InP, которые обладают температурной чувствительностью, нелинейными искажениями, двухфотонным поглощением и другими недостатками, которые не подходят для микроволновых фотонных систем [6]. Следует отметить, что на сегодняшний день большинство модуляторов разрабатывается и изготавливается на основе ниобата лития, обладающего электрооптическим эффектом. Разработки модуляторов, использующие электроабсорбционные эффекты и эффект дисперсии плазмы, находятся на начальной стадии, поэтому представляется целесообразным применение ниобата лития в качестве новой интеграционной платформы для широкополосных оптоэлектронных устройств. Материал LNOI структурно аналогичен материалу КНИ.

Cheng Wang и соавторы из Школы инженерии и прикладных наук Джона А. Полсона Гарвардского университета (США) использовали электрооптический эффект ниобата лития с фемтосекундной скоростью отклика, что позволило создать сверхширокополосные электрооптические модуляторы, поддерживающие скорость передачи данных до 210 Гбит/с и демонстрирующие оптические потери на кристалле менее 0,5 дБ. Проектируют микроволновые и фотонные схемы для одновременного достижения высокой электрооптической эффективности, сверхнизких оптических потерь и согласования групповой скорости. Эти масштабируемые модуляторы могут обеспечить экономичные, маломощные и высокоскоростные решения для оптических сетей связи следующего поколения и ФИС. Кроме того, этот подход может привести к созданию крупномасштабных фотонных схем со сверхнизкими потерями [7]. Тонкопленочный ниобат лития также имеет высокий нелинейный коэффициент, который может быть использован для генерации когерентного источника света и усиления оптических параметров. Контрастность показателя преломления платформы LNOI высокая, что позволяет создавать волноводы с низкими потерями.

В 2018 году Wang и соавторы из Гарвардского университета продемонстрировали EO-модулятор на основе LNOI с очень высокой производительностью [7], схема показана на рис. 3.

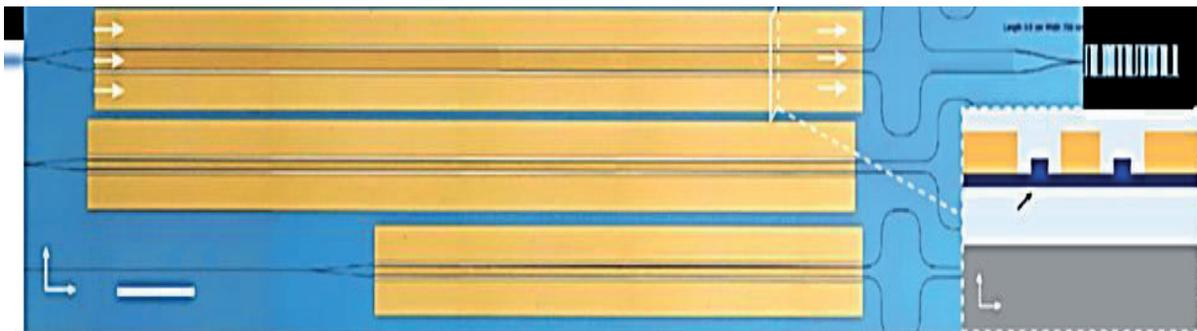


Рис. 3. Структура EO-модулятора

Реализован модулятор с электрооптической полосой пропускания более 100 ГГц, а также с относительно низким управляющим напряжением. Это исследование показало потенциал высокоскоростного применения LNOI. Кроме того, была показана интеграция частотной гребенки Керра, перестраиваемого фильтра и модулятора на одном чипе LNOI [8]. Комбинация эффекта Погкельса и эффекта Керра раскрывает перспективу многоканального передающего модуля на основе LNOI.

M.X. Li и соавторы изготовили фотонно-кристаллический электрооптический модулятор на ниобате лития, отличающийся небольшими габаритными размерами [9], также был обещан более высокий уровень интеграции чипов LNOI.

Недавно Wang Cheng и соавторы из City University Гонконга преодолели трудность изготовления и реали-

зовали волновод со сверхнизкими потерями при распространении всего 2,7 дБ/м и микрорезонаторы с добротностью до  $10^7$  [10]. Это дополнительно способствовало разработке встроенных оптических частотных гребенок. Исследовательские группы Гарвардского университета и Университета Рочестера успешно внедрили генерацию и модуляцию частотной гребенки Керра, электрооптические гребенки и оптические солитоны на LNOI. Предложенные решения позволили создать монолитные фотонные схемы на ниобате лития для генерации и модуляции частотной гребенки Керра, благодаря превосходным свойствам и низким оптическим потерям LNOI [8]. Их результаты и методы могут проложить путь к интеграции многоблочных устройств на одном чипе, которые можно будет использовать для встроенной обработки сигналов и других приложений.

Объемный материал LN широко используется в фильтрах, преобразователях, микроэлектромеханических системах и других устройствах, его производительность и надежность были полностью проверены. В последние годы появление технологии LNOI дает новую идею для разработки компактных оптических электромеханических системных устройств с высокой добротностью, одновременно демонстрирующей высокие оптические и механические показатели качества, высокую оптомеханическую связь, хорошую эффективность пьезоэлектрической связи, как представлено Wentao Jiang и соавторами из Стэнфордского университета США [11].

В 2019 году в Гарвардском университете Shao L.B. и соавторы [12] продемонстрировали первые акустооптические модуляторы (далее – AOM), изготовленные на платформе тонкопленочного LN на изоляторе толщиной 500 нм. В этой работе были продемонстрированы AOM типа «интерферометр Маха-Цендера» (далее – MZI) и AOM типа «рейстрек-резонатор» (рис. 4).

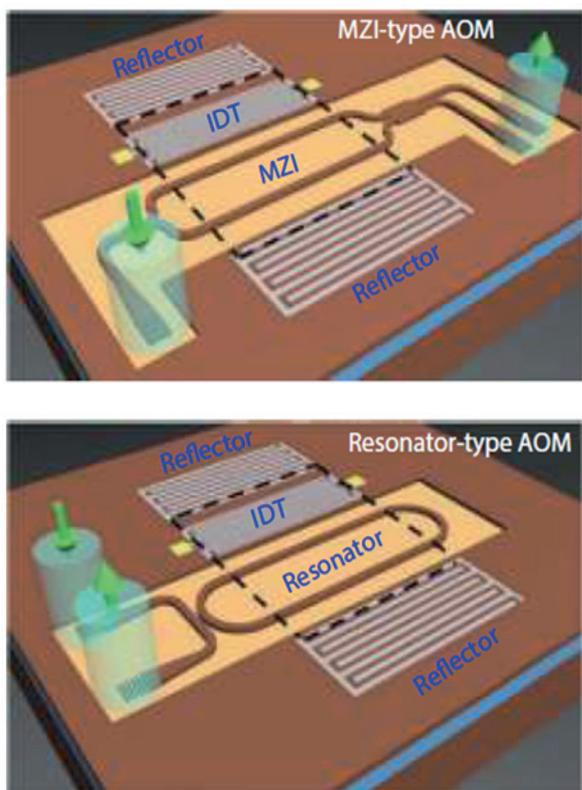


Рис.4. Топология AOM типа «MZI» и AOM типа «Резонатор»

Встречно-штыревые преобразователи, акустический резонатор и фотонные волноводы с низкими потерями полностью интегрированы в микросхему. Интегрированная фотонная платформа, которая использует привлекательные свойства ниобата лития, может обеспечить эффективное преобразование между микроволновым и оптическим полями.

Дальнейшие исследования технологии LNOI в Нанкинском университете и Университете Sun Yat-sen привели к созданию волновода из ниобата лития с периодической поляризацией (далее – PPLN) с генерацией второй гар-

моники (далее – SHG) на 1470 нм с нормированной эффективностью преобразования, составляющей 4600 %  $\text{Вт}^{-1}\text{см}^{-2}$  [13]. Кроме того, генерация разностной частоты была реализована на длине волны накачки 730 нм в видимой части спектра, а диапазон спектральной настройки генерируемого холостого хода в С-диапазоне составлял 50 нм. Группа исследователей из Йельского университета США продемонстрировала высокую эффективность SHG в двухрезонансных периодически поляризованных микрокольцах z-среза LN, в которых реализован квази-фазовый синхронизм. Абсолютная эффективность преобразования 15 % зафиксирована при малой мощности накачки 115 мкВт в волноводе [14]. Не только PPLN может достигать высокой эффективности SHG, микрорезонаторы на основе PPLN также могут достигать более высокой эффективности SHG, чем традиционный волновод. Можно ожидать высокой производительности оптических схем LNOI, основанных на методах фотолитографии, с улучшенными фотонными конструкциями.

Однако, несмотря на достигнутые параметры электрооптических и нелинейных устройств, непрягая ширина запрещенной зоны LN ограничивает его применение в источниках света и фотоприемниках. В дальнейшем необходимо преодолеть проблемы, чтобы сделать LNOI коммерчески привлекательной и конкурентоспособной интегрированной оптической платформой. Ограниченные размеры пластин и высокая стоимость одной пластины делают LNOI менее конкурентоспособной по сравнению с более зрелыми и экономичными платформами для производства пластин, такими как нитрид кремния (далее – SiN) и КНИ. В настоящий момент трудно сделать вывод о широком применении LNOI в качестве фундаментальной фотонной интеграционной платформы. Преимущества LNOI могут быть достигнуты за счет гибридной интеграции локальных островков LiNbO<sub>3</sub> на более зрелых платформах пластин, таких как SiN и КНИ. Гибридная интеграция оптических схем соединений III-V и Ge на LNOI представляется одним из наиболее перспективных способов. В целом можно сделать вывод, что LNOI является быстро развивающейся платформой, однако необходимо экспериментально продемонстрировать больше оптических элементов ФИС для этой платформы.

#### Фотонные интегральные схемы на основе кремния

Кремниевые технологии позволяют создавать широкий спектр фотонных интегральных схем. Это обусловлено глубокой проработкой кремниевой технологии, которая является основной при производстве современной микроэлектроники. В фотонных интегральных приложениях широко используются различные соединения для формирования волноводов, прежде всего это SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, SiON/SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> и Si/SiO<sub>2</sub>. Волноводы на основе SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> условно можно отнести к волноводам низкой контрастности (0,3...4 %), технология получения SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> позволяет изготавливать плёнки с показателем преломления в диапазоне  $n = 1,45...2,0$ , что при использовании кладдинга из SiO<sub>2</sub> соответствует диапазону контрастности

$n = 0,3...2,3$  % [15]. Предельным вариантом этой технологии является нитрид кремния  $Si_3N_4$ . И, наконец, волноводы на основе Si имеют показатель преломления  $n \sim 3,5$ . Такой достаточно широкий выбор показателей преломления позволяет создавать приборы разного назначения и технических параметров в рамках одной технологической линейки.

Волноводы низкой контрастности имеют наименьшие оптические потери на уровне сотых долей дБ/см. При этом следует учитывать, что потери света определяются как собственным поглощением материалов волноводной структуры, так и потерями, обусловленными неровностями боковых поверхностей волновода. Очевидно, что в случае эквивалентных шероховатостей стенок волноводов потери на неровностях будут более значительными в волноводах с локализацией поля в меньшем объёме, т.е. в волноводах с большим показателем преломления. Поэтому для задач создания приборов с наименьшими потерями предпочтительно использовать волноводы с низким контрастом показателя преломления, для задач, где первостепенным является выполнение заданных функций при минимальных габаритных размерах, а потерями в той или иной степени можно пренебречь, предпочтение отдаётся волноводам с большей контрастностью, например  $Si_3N_4$  или Si (КНИ). Кроме того, при разработке ФИС и выборе базовой технологии их изготовления учитывается такой фактор, как потери при вводе света в волноводную структуру ФИС и последующего его вывода. Как правило, подвод света осуществляется одномодовыми оптоволоконными с вполне определённым размером оптической моды. Размер оптической моды волноводов ФИС в общем случае обратно пропорционален их контрастности. Таким образом, из-за несоответствия размеров мод оптоволоконна и приёмного волновода возникает проблема оптических потерь на вводе/выводе. Именно поэтому, представляют интерес материалы, позволяющие создавать волноводы низкой контрастности, при которой размер волноводных мод будет примерно равным для оптоволоконна и волновода и, следовательно, оптические потери на стыковке будут минимальными без использования согласующих размер моды элементов. Это справедливо для волноводов контрастностью примерно до 0,7 %. Для большей контрастности желательным является использование элементов согласования размера мод – модовых конвертеров, преобразующих моду большого размера оптоволоконна в моду маленького размера волновода.

#### ФИС на волноводах низкой контрастности

К настоящему времени на основе волноводов низкой контрастности «стекло на кремнии» изготавливаются коммерчески доступные ФИС такие как разветвители (PLC-сплиттеры) и мультиплексоры/демультиплексоры. Причём из-за простоты конструкции разветвителя и отсутствия габаритных ограничений производители в стремлении минимизации потерь предпочитают использовать волноводы низкой контрастности, что приводит к увеличению размеров волноводов примерно до 6...8 мкм. Волно-

воды с такими размерами технологически проще изготавливать уже не на Si-подложках, а на кварцевых. Несмотря на это технологические лидеры в фотонике предлагают своим заказчикам выбор между кремниевой и кварцевой подложкой.

На основе волноводов низкой контрастности также изготавливают широко используемые в современных системах оптической телекоммуникации AWG-мультиплексоры. Для изделий такого типа преимущественно используются контрастности в диапазоне 0,7...1,5 %, причём изделия с повышенной контрастностью разработчики комплектуют модовыми конвертерами для снижения потерь на вводе/выводе света.

$SiO_2$ -волноводную технологию используют не только для создания гомогенных устройств. Например, в работе [16] описана конструкция и параметры широко используемого в волноводной оптике циркулятора, изготовленного на основе волноводов с контрастностью 0,3 % с интегрированными полиамидными полуволновыми пластинками.

#### ФИС на волноводах средней контрастности

Нитрид кремния  $Si_3N_4$  по показателю преломления занимает промежуточное положение между волноводами на основе  $SiO_2$  ( $SiO_2:GeO_2$ , SiON) и Si. Его показатель преломления на длине волны 1550 нм  $n \sim 2,1$ , что означает волноводный контраст при использовании кладдинга из  $SiO_2 \sim 26$  %. Запрещённая зона  $Si_3N_4$  составляет 5,0 эВ, которая примерно в 4 раза больше запрещённой зоны Si. Этим объясняется снижение нижней границы пропускания в УФ - область – 0,25 мкм. Верхняя граница окна пропускания равна 8 мкм, таким образом  $Si_3N_4$  характеризуется широким окном прозрачности (0,25...8,0 мкм), который перекрывает видимый и ближний ИК-диапазоны [17]. В совокупности это характеризует  $Si_3N_4$  как материал, обладающий низким поглощением света в достаточно широком диапазоне длин волн. Кроме этого, этот материал характеризуется низким термо-оптическим коэффициентом, который на порядок меньше значения для Si. Это выгодно отличает этот материал в сравнении с кремнием в задачах, где требуется снижение влияния температуры. К таким задачам, например, относятся задачи сенсорики. Ещё одним достоинством  $Si_3N_4$  является незначительное двухфотонное поглощение в сравнении с Si. Это позволяет использовать этот материал для передач относительно большой оптической мощности, что опять-таки, актуально в задачах сенсорики. В связи с этим нитрид кремния можно часто встретить именно в сенсорных устройствах, в том числе в устройствах биомедицинского назначения.

Однако, при этих достоинствах оптических волноводов, изготовить качественные  $Si_3N_4$ -волноводы является достаточно сложной задачей. Это проявляется в образовании большого числа водородных связей при осаждении и возникновении сильных напряжений при осаждении на Si-подложки. Нитрид кремния можно получить двумя методами: плазмо-химическим осаждением (далее – PECVD) и химическим осаждением при низком давлении (далее – LPCVD). Первый метод позволяет получать толстые

плёнки, но их однородность уступает плёнкам, полученным методом LPCVD. Кроме этого, плёнки, полученные PECVD, характеризуются меньшей стехиометричностью и содержат большое количество водородных связей N-H и Si-H, которые вызывают сильные оптические потери на длинах волн, вблизи 1550 нм [18]. Плёнки, полученные методом LPCVD, характеризуются лучшей однородностью по толщине и меньшим количеством водородных связей.

Второй существенной проблемой, возникающей при осаждении плёнок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , являются напряжения, возникающие из-за несоответствия термического коэффициента расширения нитрида кремния и кремниевой подложки, на которую производят осаждение. Для  $\text{Si}_3\text{N}_4$  этот показатель равен  $2,35 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , для кремния –  $2,61 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Такая разница приводит к возникновению сильных напряжений при охлаждении пластин после процесса осаждения, что может приводить к растрескиванию осаждённого слоя. Долгое время типичной толщиной  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -волноводов была величина не более 300 нм, при этом производители предпочитали осажать такие плёнки на 4" пластины, т.к. на пластинах большего размера проблема усугублялась. В последние два десятилетия исследователям удалось разработать технологии осаждения плёнок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  для оптических волноводов толщиной до 700...770 нм [19]. Для формирования волноводов такой толщины используется так называемый дамасский процесс (Damascene process), при котором волноводы формируются не способом травления осаждённого волноводного слоя, а формируются в предварительно созданных канавках в нижнем кладдинге. Авторы [20] сообщают, что, используя данную технологию, им удалось получить волноводы толщиной 700 нм с затуханием 0,05 дБ/см на длине волны 1550 нм, в то время как авторам [19] удалось получить на волноводах толщиной 400 нм потери в пределах 0,157 дБ/см на длине волны 1550 нм и 0,06 дБ/см на длине волны 1580 нм.

#### ФИС на волноводах высокой контрастности

Технология «кремний на изоляторе» в настоящее время рассматривается как одна из базовых для создания многофункциональных ФИС для приёмо-передающих устройств оптической связи. Уже сейчас на рынке присутствуют устройства, в состав которых входят ФИС, осуществляющие как функции генерации, модуляции и передачи оптического сигнала, состоящего из нескольких несущих длин волн, с общей скоростью более 100 Гб/с, так и функции приёма оптического сигнала с несколькими несущими, их разделение и преобразование в многоканальный электрический информационный поток.

В структурах КНИ волновод формируют в слое Si, сформированного на  $\text{SiO}_2$ -изоляторе, и закрывают его традиционным защитным слоем  $\text{SiO}_2$ . Типичное значение показателя преломления Si на длине волны 1550 нм  $n = 3,476$ , для  $\text{SiO}_2$  –  $n = 1,444$ . Таким образом, волноводный контраст примерно равен ~ 41 %. Область прозрачности Si находится в диапазоне длин волн 1,1...8 мкм. Согласно [21]  $\text{SiO}_2$ , полученный методом PECVD, пропускает свет без заметного поглощения вплоть до длины волны

2,6 мкм. При больших длинах волн общие потери в волноводах увеличиваются из-за поглощения в кладдинге  $\text{SiO}_2$ . Таким образом, структуры  $\text{SiO}_2$ -Si- $\text{SiO}_2$  наиболее эффективны для волноводной оптики примерно в диапазоне 1,1...2,6 мкм. Подробное рассмотрение возможности использования КНИ-структур для длин волн более 2,6 мкм проведено в работе [22].

В связи с тем, что показатель преломления Si достаточно высок, оптическая мода света в такой среде оказывается более чувствительной к неровностям боковых стенок. По этой причине разработчики часто используют гребешковые волноводы, вместо канальных, у которых высота стенок травления более чем в два раза меньше толщины волновода.

Для Si-волноводов наиболее часто используются пластины с толщиной Si слоя 200...220 нм. Типичная ширина волноводов при таких толщинах 400...500 нм. Нижний кладдинг из  $\text{SiO}_2$  толщиной 2 мкм.

На КНИ платформе реализуют практически весь спектр интегрально-оптических устройств, кроме усилительных элементов. Высокий контраст между Si ( $n \sim 3,5$ ) и  $\text{SiO}_2$  ( $n \sim 1,444$ ) приводит к сильному удержанию оптической моды, что позволяет использовать относительно малые радиусы изгибов волноводов (порядка нескольких микрон) с малыми потерями. Подробно вопросы потерь и проектирования поворотов на  $90^\circ$  и  $180^\circ$  рассмотрены в работе [23]. Благодаря малым радиусам поворотов, геометрические размеры элементов на КНИ-структурах имеют минимальные размеры в сравнении с элементами на  $\text{SiO}_2$ - и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -платформах.

Важным элементом, на который обращено внимание исследователей, является модулятор. Разработка конструкции высокочастотного модулятора является одной из приоритетных задач кремниевой фотоники, часто используемая на практике структура модулятора представлена на рис. 5. Полученные частоты модуляции равны 40 ГГц.

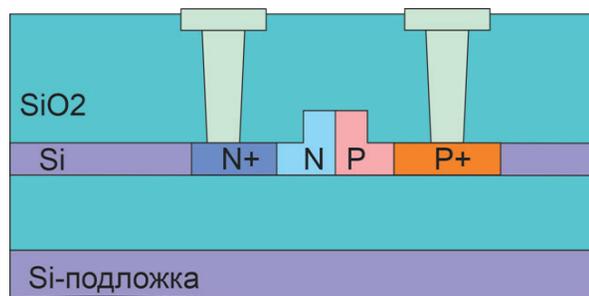


Рис.5. Структурная схема Si-модулятора

#### Заключение

Технология ФИС является перспективным направлением развития техники и вызывает интерес у ведущих мировых производителей электроники. С помощью ФИС возможна реализация высокоскоростной передачи и обработки больших объемов данных. В то же время данная технология находится всё ещё на начальном этапе своего развития, поэтому крайне важно не допустить отставания отечественной промышленности в этой области.

В наши дни ФИС на основе InP играют важную роль в цифровых оптических линиях связи, а их современные технические и коммерческие возможности теперь доступны и для других применений.

В настоящее время на территории Российской Федерации отсутствуют производства полного цикла ФИС, позволяющие производить опытно-промышленную обработку научно-технических и промышленно-технологических решений от разработки (моделирование и дизайн) до производства коммерческих чипов и полнофункциональных устройств.

Более того, несмотря на сходство технологии и возможности интеграции ее в существующие микроэлектронные производства, на данном этапе этот шаг невозможен по ряду причин, в том числе: из-за начальной стадии освоения технологии не только в Российской Федерации, но и во всем мире; из-за отсутствия у заводов опытных линеек, на которых было бы возможно провести пилотирование технологии; из-за перегруженности производств для нужд ВПК и гражданского сектора.

В сложившейся геополитической и экономической обстановке для нашей страны очевидна необходимость создания отечественных САПР, PDK, технологических цепочек, строительства фабрик и освоения производства всех функциональных элементов ФИС, а также аппаратуры, в которой эти ФИС будут применяться. Эта задача является стратегической, поскольку в условиях санкций о полномасштабном международном партнерстве не может быть и речи.

В марте 2023 года дан старт реализации комплексного проекта создания опытно-промышленного производства ФИС, включая строительство и оснащение необходимым технологическим оборудованием «Инновационного лабораторно-промышленного корпуса № 5» (г. Зеленоград, площадка «Алабушево»), со сроком ввода в эксплуатацию IV кв. 2024 года.

В целях опережающего формирования базовых технологий проектирования (программное обеспечение проектирования, библиотеки материалов и элементов PDK и производства ФИС в интересах реализации проекта Министерство промышленности и торговли Российской Федерации инициировало проведение комплекса работ по созданию научного, технического и технологического задела по направлениям развития интегральной фотоники на базе двух технологических процессов: КНИ и InP.

Целью реализации проекта является создание дизайн-центра и опытно-промышленного производства, обеспечивающих возможность разработки и изготовления перспективных функционально законченных ФИС и продуктов на их основе. Достижение указанной цели может быть реализовано путем создания и отработки базовых технологий проектирования и производства на примере когерентного оптического трансивера, обеспечивающего скорость передачи до 100 Гбит/сек, лидаров, систем радиофотоники, сенсорики, квантовых систем, а также систем оптического симулятора и систем искусственного интеллекта на основе оптических нейросетей. Целесообразность освоения производства указанных устройств определяется необходимым и достаточным набором ключевых компонентов, характерных

для ФИС, что позволит создать базовые технологии проектирования и изготовления полного набора базовых компонентов для перечисленных выше устройств с размером кристалла не более  $10 \times 10$  мм, а также отработать технологии гетерогенной и гомогенной интеграции ФИС.

В интегральной фотонике в последние десятилетия активно развивается направление интеграции разных технологий для взаимного дополнения и решения задач, которые невозможно или сложно решить в пределах только одной технологии. Прежде всего речь идет об интеграции прямозонных полупроводников групп III-V с кремниевой волноводной структурой, а также интеграция фотонной и управляющей электрической части модуля, что позволяет создавать малогабаритные фотонные интегральные схемы на основе Si с самым широким функционалом и отличающиеся энергоэффективностью, надежностью, сниженным весом и повышенным быстродействием. Уже продемонстрированы экспериментальные модели, такие как синтезаторы оптических частот в масштабе чипа [24], гребенчатые источники оптических частот с батарейным питанием [25] и эксперименты по высокоскоростной оптической связи [26]. В промышленном масштабе такие компании, как Cisco, Juniper, Infinera Corporation и Huawei уже предлагают коммерческие продукты, использующие ФИС для широкополосных оптических систем связи.

Интеграцию элементов, изготовленных разными технологическими платформами, можно разделить на два типа: гибридная и гетерогенная. Под гибридной интеграцией понимают процесс интеграции, который соединяет две или более микросхем ФИС или фотонных устройств, обычно из разных технологических платформ, в одну единую микроструктуру. Например, гибридная интеграция использовалась для интеграции полностью готовых устройств III-V (лазерные чипы), чипы усиления или даже фотодиоды на кремнии и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -ФИС. Обработанные чипы могут быть установлены непосредственно на ФИС, так и рядом с ним.

Разработки в области интегрированной оптической платформы из LNOI были предназначены для ключевых строительных блоков фотонных интегральных схем с высокой интеграцией, включая оптические волноводы с малыми потерями, электрооптические интерфейсы для сверхбыстрой модуляции, нелинейные оптические элементы и резонаторы. Очевидны потенциальные преимущества LNOI: это чрезвычайно низкие потери 2,7 дБ/м, плотные радиусы изгиба волновода, доступные в платформе LNOI, сравнимы с хорошо зарекомендовавшими себя платформами SiN, компактность устройств, электрооптические и нелинейные оптические свойства LN.

Чтобы сделать LNOI привлекательной и конкурентоспособной интегрированной оптической платформой для ФИС, необходимо проведение НИОКР. Требуется проведение исследований, направленных на улучшение оптического сопряжения с волноводами LNOI, уменьшающее переходное затухание. Необходимо еще более высокий уровень добротности резонаторов в LNOI, для их использования в эффективных нелинейных источниках оптических гребенок. Также представляют интерес исследования в направлении гете-

рогенной интеграции лазеров и волноводов, продолжение разработки фотодетекторов на волноводах. Все эти работы очень важны для будущих ФИС, поскольку это позволит повысить стабильность устройств и устранить дополнительные потери связи. В целом можно сделать вывод, что LNOI является быстро развивающейся платформой, но не все методы изготовления LNOI подходят пока для массового фаундри-производства устройств на основе LNOI.

Таким образом, построение современных телекоммуникационных систем, центров обработки большого объема данных с возможностью обмена ими в режиме реального времени по оптическим каналам связи невозможно без применения ФИС. В свою очередь, для создания ФИС на различных платформах, а также определения предпочтительных платформ для решения конкретных технических задач требуется наращивание объемов исследований.

### Литература

1. H. Zhao, S. Pinna, B. Song, L. Megalini, S.T. Suran Brunelli, L. Coldren, J. Klamkin, «High-Power Integrated Indium Phosphide Transmitter for Free Space Optical Communications», Conference on Lasers and Electro-Optics, paper JW2A.52, 2018.
2. R. Nagarajan et al. «Large-scale photonic integrated circuits» IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. 11, No. 1, pp. 50-65, Jan. 2005.
3. V. Lal et al. «Extended C-Band Tunable Multi-Channel InP-Based Coherent Transmitter PICs» J. Light. Technol., Vol. 35, No. 7, pp. 1320–1327, Apr. 2017.
4. Thomson D., Zilkie A., Bowers J.E., et al. «Roadmap on silicon photonics». J. Opt., 2016, 18, 073003.
5. Van der Tol J.J.G.M., Jiao Y.Q., Shen L.F., et al. Indium phosphide integrated photonics in membranes. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 2018, 24, 1.
6. Wang C., Zhang M., Stern B., et al. «Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators». Opt. Express, 2018, 26, 1547.
7. Wang C., Zhang M., Chen X., et al. «Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages». Nature, 2018, 562, 101.
8. Wang C., Zhang M., Yu M., et al. «Monolithic lithium niobate photonic circuits for Kerr frequency comb generation and modulation». Nat. Commun., 2019, 10, 978.
9. Li M.X., Ling J.W., He Y., et al. «Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator». Nat. Commun., 2020, 11, 4123.
10. Zhang M., Wang C., Cheng R., et al. «Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator». Optica, 2017, 4, 1536.
11. Jiang W.T., Patel R.N., Mayor F.M., et al. «Lithium niobate piezo-optomechanical crystals». Optica, 2019, 6, 845.
12. Shao L.B., Yu M.J., Maity S., et al. «Microwave-to-optical conversion using lithium niobate thin-film acoustic resonators». Optica, 2019, 6, 1498.
13. Rao A., et al. «Actively-monitored periodic-poling in thin-film lithium niobate photonic waveguides with ultrahigh nonlinear conversion efficiency of 4600 %  $W^{-1}cm^{-2}$ ». Opt. Express, 2019, 27, 25920.
14. Lu J.J., Surya J.B., Liu X.W., et al. «Periodically poled thin-film lithium niobate microring resonators with a second-harmonic generation efficiency of 250,000%/W». Optica, 2019, 6, 1455.
15. R.M. de Ridder, K. Worhoff, A. Driessen, P.V. Lambeck, and H. Albers, «Silicon oxynitride planar waveguiding structures for application in optical communication» IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron. 4, 930-937 (1998).
16. Sugimoto N.; Shintaku T.; Tate A.; Terui H.; Shimokozono M.; Kubota E.; Ishii M.; Inoue Y. «Waveguide polarization-independent optical circulator» // IEEE Photonics Technology Letters, v.11(3), pp.355–357, (1999) doi:10.1109/68.748233.
17. Su Y.; Yong Z.; Qiu C.; Guo X.; Lu S. «Silicon Photonic Platform for Passive Waveguide Devices: Materials, Fabrication, and Applications». Adv. Mater. Technol. 2020, 5, 1901153.
18. Li D.; Li B.; Tang B.; Zhang P.; Yang Y.; Liu R.; Xie L.; Li Z. «Broadband Silicon Nitride Power Splitter Based on Bent Directional Couplers with Low Thermal Sensitivity». Micromachines 2022, 13, 559.
19. Li Z.; Fan Z.; Zhou J.; Cong Q.; Zeng X.; Zhang Y.; Jia L. «Process Development of Low-Loss LPCVD Silicon Nitride Waveguides on 8-Inch Wafer». Appl. Sci. 2023, 13, 3660. <https://doi.org/10.3390/app13063660>.
20. M.H.P. Pfeiffer et al., «Photonic Damascene Process for Low-Loss, High-Confinement Silicon Nitride Waveguides» in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 24, no. 4, pp. 1-11, July-Aug. 2018, Art no. 6101411, doi: 10.1109/JSTQE.2018.2808258.
21. Lin, Hongtao & Luo, Zhengqian & Gu, Tian & Kimerling, Lionel & Wada, Kazumi & Agarwal, Anuradha & Hu, Juejun. (2017). «Mid-infrared integrated photonics on silicon: A perspective». Nanophotonics. 7. 10.1515/nanoph-2017-0085
22. M. Nedeljkovic, A.Z. Khokhar, Y. Hu, X. Chen, J. Soler Penades, S. Stankovic, H. M. H. Chong, D. J. Thomson, F. Y. Gardes, G. T. Reed, and G. Z. Mashanovich, «Silicon photonic devices and platforms for the mid-infrared», Opt. Mater. Express 3, 1205-1214 (2013).
23. M. Bahadori, M. Nikdast, Q. Cheng and K. Bergman, «Universal Design of Waveguide Bends in Silicon-on-Insulator Photonics Platform» in Journal of Lightwave Technology, vol. 37, no. 13, pp. 3044-3054, 1 July1, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2909983.
24. Spencer, D.T., Drake, T., Briles, T.C. et al. «An optical-frequency synthesizer using integrated photonics». Nature 557, 81–85 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0065-7>.
25. Stern B., Ji X., Okawachi Y. et al. «Battery-operated integrated frequency comb generator». Nature 562, 401–405 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0598-9>.
26. Corcoran B., Tan, M., Xu, X. et al. «Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source». Nat Commun 11, 2568 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16265-x>.

ОТКАЗЫ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ  
ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИFAILURES OF MOSFETS DURING IRRADIATION  
WITH HEAVY IONS

Митин Е.В., Семутенко Ю.Н., Гридасов Л.В., ООО «НПЦ «Гранат», emitin@npcgranat.ru, lgridasov@npcgranat.ru, +7(911) 844-35-70  
Mitin E.V., Semutenko Yu.N., Gridasov L.V., LLC "SPC "Granat", emitin@npcgranat.ru, lgridasov@npcgranat.ru, +7(911) 844-35-70

**Аннотация.** Приведены результаты испытаний и исследований стойкости МОП-транзисторов к воздействию тяжелых заряженных частиц. Обсуждаются проявления и условия возникновения отказов различных типов, а также влияние на них таких факторов, как электрический режим при облучении и угол падения частиц. На основании выявленных закономерностей сформированы предложения по оптимизации методик испытаний и направлениям дальнейшего изучения отказоустойчивости МОП-транзисторов и изделий на их основе.

**Annotation.** The results of tests and studies of the resistance of MOSFETs to the effects of heavy charged particles are presented. The manifestations and conditions of various types of failures are discussed, as well as the influence of factors such as the electrical regime during irradiation and the angle of incidence of particles on the chip. Based on the revealed patterns, proposals were formed to optimize test methods and directions for further study of the fault tolerance of MOSFETs and products based on them.

**Ключевые слова:** МОП-транзистор, тяжелые заряженные частицы, SEGR, SEB, пробой, исследования, латентный дефект.

**Keywords:** MOSFET, heavy charged particles, SEGR, SEB, breakdown, research, latent defect.

## Вступление

Одними из доминирующих видов отказов изделий электронной техники при воздействии факторов космического пространства являются пробой в МОП-транзисторах при воздействии тяжелых заряженных частиц (далее – ТЗЧ) [1]. Согласно проведенным исследованиям, результаты которых закреплены в нормативных документах [2, 3], данные отказы условно делятся на три категории: пробой подзатворного диэлектрика (англ. SEGR – single event gate rupture), пробой («выгорание») объемной полупроводниковой структуры (SEB – single event burnout), и возникновение латентных дефектов (далее – ЛД), приводящих к пробую при подаче нормированного напряжения затвор-исток транзистора. Каждый из этих эффектов имеет особенности, зависящие как от различных условий в процессе испытаний, так и от электрических и иных режимов эксплуатации изделий в целевой аппаратуре заказчика. В данной публикации проанализированы различные аспекты возникновения данных отказов МОП-транзисторов при воздействии ТЗЧ и сформулированы рекомендации к процедуре их испытаний.

## Основная часть

## 1 Описание отказов типа SEGR, SEB и ЛД

## 1.1 Пробой подзатворного диэлектрика

Эффект SEGR в МОП – структурах впервые обнаружен в 1984 г. [4] и достаточно интенсивно исследовался, прежде всего, в мощных МОП-транзисторах с вертикальной



Митин Е.В.



Семутенко Ю.Н.



Гридасов Л.В.

структурой [5-7]. Тем не менее, этот эффект обнаружен и в других классах электронной компонентной базы (далее – ЭКБ), так, в [8] описан пробой интегральной емкости в операционных усилителях (ОУ), в [9] – SEGR в программируемых логических интегральных схемах (далее – ПЛИС) типа “antifuse”, в [10] – SEGR в динамических оперативных запоминающих устройствах (далее – ДОЗУ). Суть эффекта состоит в следующем (см. рис. 1). При пролете ТЗЧ через элементарный МОП-транзистор (далее – МОПТ) возникает локальная ионизация диэлектрика, приводящая к снижению его пробивного напряжения, и подложки. В случае, если подложка находится под потенциалом (как это имеет место в мощных МОПТ с вертикальной структурой), то этот потенциал подводится к диэлектрику, дополнительно способствуя его пробую. Последнее обстоятельство обуславливает особую чувствительность этого класса ЭКБ к SEGR.

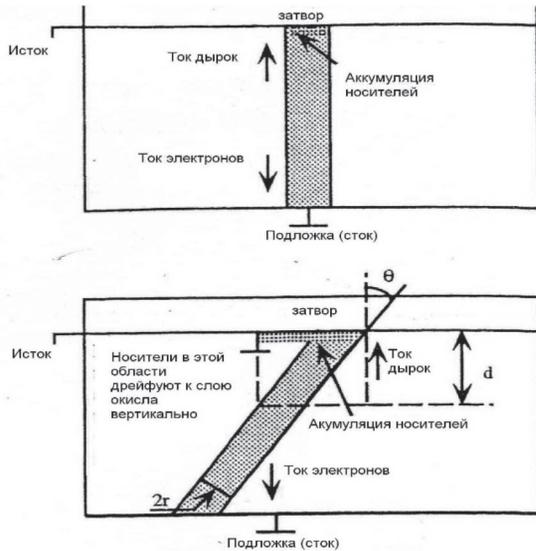


Рис. 1. Упрощенный механизм эффекта SEGR [11].  
На верхнем рисунке показан случай нормального падения ТЗЧ на МОП-структуру, на нижнем – падение под углом  $\theta$ .  
 $2r$  – удвоенный радиус (диаметр) ионизационного трека.  
Накопление носителей под слоем окисла приводит к локальному росту напряженности поля и пробую.

В отличие от других видов одиночных радиационных эффектов, SEGR имеет следующие особенности:

- механизм SEGR включает локализованную ионизацию диэлектрика, что препятствует применению для имитации этого эффекта лазерных и импульсных гамма-установок;
- отказ при SEGR имеет катастрофический характер, причем в случае интегральных схем (далее – ИС) большой степени интеграции необратимо выходит из строя одна элементарная ячейка, а случае ОУ и мощных МОПТ – все изделие. В отличие от эффекта SEB, отключение напряже-

ния питания или установка в цепь питания высокоомных резисторов не парировать отказ, поскольку он развивается за счет внутренней емкости прибора;

- температурная зависимость эффекта отсутствует [5];
- нормальное падение ионов на кристалл является наихудшим случаем – порог возникновения SEGR по линейным потерям энергии (далее – ЛПЭ) ионов и напряжению питания при этом минимальны. Упрощенно это следует из рис. 1: поскольку носители дрейфуют к границе окисла вдоль линий электрического поля, то область их повышенной концентрации, в которой и происходит пробой, оказывается распределена вдоль проекции трека на слой диэлектрика, и увеличивается с ростом угла падения частиц;
- сильная зависимость эффекта от напряжения питания.

При оценке стойкости МОПТ с вертикальной структурой необходимо учитывать, что пробеги частиц должны превышать толщину эпитаксиального слоя транзистора, которую можно оценить по следующей формуле:

$$d \approx 2,726 \cdot 10^{-6} \cdot (U_{ds\_max})^{1,667}, \quad (1)$$

где:  $d$  – толщина эпитаксиального слоя, см;

$U_{ds\_max}$  – максимальное (по ТУ или спецификации) напряжение сток-исток МОПТ (напряжение пробоя сток-исток), В.

Количественные оценки чувствительности к SEGR мощных МОПТ, используемых в аппаратуре современных космических аппаратов (далее – КА), можно сделать на основании результатов испытаний, приведенных автором [11] (см. табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний некоторых типов (N-канальных) МОП-транзисторов на чувствительность к SEGR

№ п/п	Тип МОПТ	Максимальное напряжение сток-исток $U_{ds\_max}$ , В	Напряжение пробоя сток-исток (при воздействии ТЗЧ с ЛПЭ 40 МэВ·см <sup>2</sup> /мг и напряжении затвор-исток $U_{gs} = 0$ В) $U_{ds\_SEGR}$ , В	$U_{ds\_SEGR} / U_{ds\_max}$ , %
1	IRFP360	400	400	100
2	IRF7494	150	140	93,3
3	IRFS52N15	150	70	46,7
4	IRF1310	100	60	60
5	IRFP90N20	200	70	35
6	IRLI2910	100	60	60

Данные приводятся для напряжения затвор-исток  $U_{gs} = 0$  В, что соответствует наименьшей чувствительности к SEGR. Однако даже при максимальном отрицательном значении  $U_{gs}$  пороги чувствительности по ЛПЭ составляли более  $\approx 10$  МэВ·см<sup>2</sup>/мг, что говорит об отсутствии в данных изделиях отказов типа SEGR при воздействии высокоэнергетических протонов (далее – ВЭП). При уровнях ЛПЭ ТЗЧ  $\approx 40$  МэВ·см<sup>2</sup>/мг, характерных для тре-

бований к ЭКБ КА, стойкость к SEGR обеспечивается при напряжениях сток-исток порядка 30 % от максимальных по спецификации на изделия.

### 1.2 Эффект «выгорания»

Эффект SEB открыт в одно время с SEGR [12] и исследовался более широко [13 – 15]. Механизм возникновения SEB заключается в активации паразитного биполярного транзистора МОП-структуры с последующим регенератив-

ным процессом нарастания тока вплоть до расплавления ячейки (см. рис. 2).

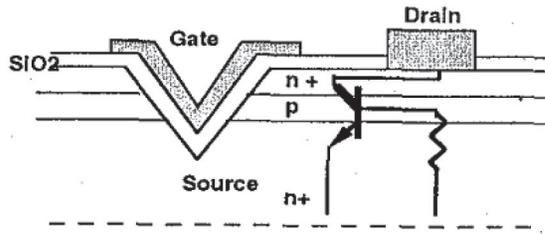


Рис. 2. Паразитный биполярный транзистор в канавчатой комплементарной МОП-структуре ИС UCC1804 [16]. Gate, Drain, Source – затвор, сток, исток структуры соответственно, SiO<sub>2</sub> – слой диоксида кремния.

SEB имеет следующие особенности:

- выгорание может быть активировано любым импульсным воздействием, обеспечивающим объемную ионизацию полупроводниковой структуры, поэтому для исследований и испытаний SEB широко используются импульсные гамма – и лазерные установки;

- отказ при SEB имеет катастрофический характер, но может быть парирован своевременным отключением питания или установкой в цепь стока высокоомных резисторов; при этом в некоторых типах МОПТ, состоящих из множества параллельно включенных ячеек, возможно выгорание отдельных ячеек, что приводит к характерному плавному возрастанию тока утечки ток-исток [12];

- рост температуры приводит к некоторому снижению сечения SEB вследствие, вероятно, снижения коэффициента умножения носителей [17];

- нормальное падение ионов на кристалл является наихудшим случаем (то есть, порог возникновения SEB по ЛПЭ ионов и напряжению питания при этом минимальны);

- чувствительность к эффекту зависит от напряжения сток-исток, однако практически не связана с напряжением на затворе.

### 1.3 Латентные дефекты

Латентные дефекты (далее – ЛД) понимаются как дефекты, проявляющиеся в росте тока утечки затвора МОП-транзистора («мягкий пробой»), так и скрытые дефекты, обнаруживающиеся лишь специальными методами (рис. 3, 4).

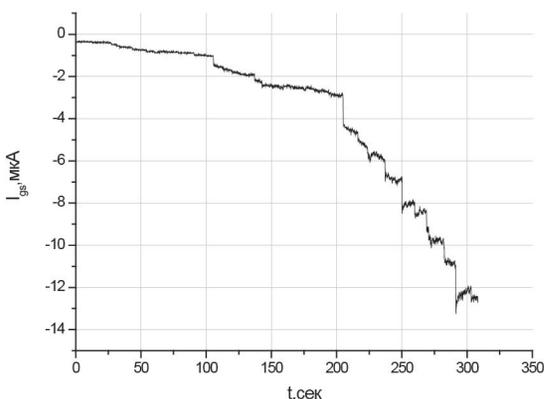


Рис. 3. Проявление «мягкого пробоя» затвора МОП-транзистора FDN5618 при облучении ТЗЧ (по горизонтальной оси – длительность облучения, по вертикальной – ток утечки затвор-исток) [18].

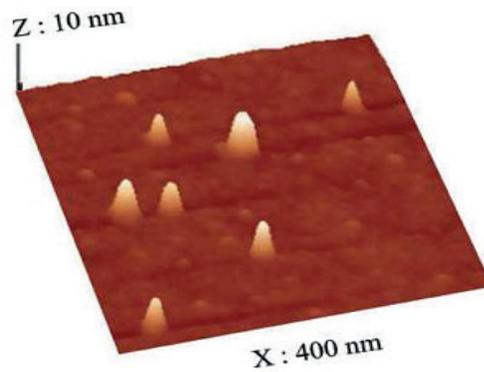


Рис. 4. Картина скрытых дефектов в окисле МДП-структуры после облучения ТЗЧ, полученная с помощью атомно-силовой микроскопии [18].

«Мягкий пробой» может при последующем электрическом воздействии развиваться в «катастрофический пробой». С целью выявления ЛД, нормативные методы испытаний на стойкость к SEGR [1-2] предусматривают проведение так называемого «послерадационного испытания целостности затвора» (далее – PIGST). Данный тест обычно проводится путем приложения к затвору транзистора максимально допустимого напряжения с одновременным контролем тока утечки затвор-исток. Подобный простой подход, однако, имеет существенные недостатки. Во-первых, в процессе PIGST дефекты могут остаться в латентном состоянии, которое, тем не менее, способно влиять на долговременную надежность диэлектрика [19]. Во-вторых, отказ изделия констатируется даже в том случае, когда «тяжелый пробой» отсутствует – критерием служит лишь превышение током утечки затвора, заданного в спецификации на транзистор уровня (обычно 100 нА). Но многие работы показывают, что при отсутствии катастрофических отказов при PIGST транзисторы являются полностью функциональными в процессе дальнейшей длительной эксплуатации [20, 21]. Наконец, данный метод не позволяет изучить такие параметры, как надежность диэлектрика после облучения ТЗЧ или токовые характеристики и динамику развития дефектов.

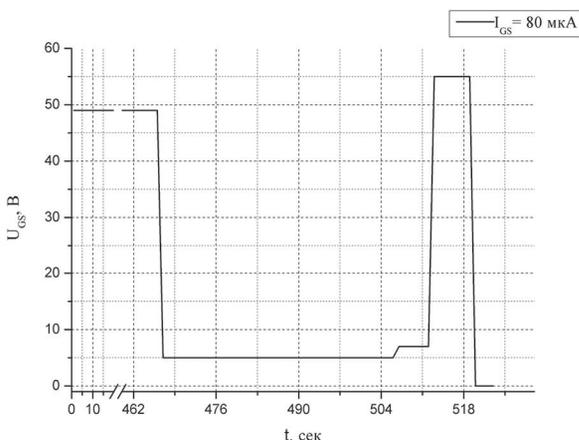
Авторами [22] проведено исследование свойств подзатворного окисла МОП-транзисторов после облучения тяжелыми ионами методом измерения «заряда до пробоя» (далее – Q<sub>BD</sub>). Одновременно, в продолжение работ [18, 23], изучено влияние на результаты таких факторов как угол падения частиц и электрический режим (напряжения сток-исток U<sub>ds</sub> и затвор-исток U<sub>gs</sub>) при облучении. Объектом исследования служили N-канальные МОПТ типа IFR540NS. Перед облучением образцы проходили операцию химической декапсуляции на базе ООО «НПЦ «Гранат» для обеспечения доступа пучков ионов к кристаллам изделий. Предварительно облучению была подвергнута тестовая выборка транзисторов для установления допустимого диапазона значений (U<sub>ds</sub>, U<sub>gs</sub>), не приводящих к возникновению SEGR в процессе воздействия ионов, и дальнейшие облучения проводились в пределах этого диапазона. Кроме того, одна из выборок облучалась при нулевых потенциалах на затворе и стоке до удвоенного (2·10<sup>6</sup> ион/см<sup>2</sup>) флюенса частиц при нормальном их падении для исследования кумулятивного характера ЛД.

В результате были получены три основных тренда зависимости:

- мгновенный «тяжелый пробой» образцов при приложении тестовой нагрузки (чаще всего наблюдался для изделий, облученных при угловом падении частиц и значительном напряжении  $U_{gs}$ );
- «классическая» картина пробоя окисла при приложении постоянной токовой нагрузки, а именно – сохранение приблизительно постоянного падения напряжения на диэлектрике с последующим внезапным его уменьшением практически до нуля, соответствующим возникновению SEGR;
- ступенчатое уменьшение падения напряжения на диэлектрике (характерно для изделий, облученных высокими флюенсами частиц), в некоторых случаях сопровождавшееся аномалиями проводимости. Такое поведение в литературе [24] соответствует динамике развития «мягкого пробоя».

Эталонные образцы продемонстрировали все три указанных механизма возникновения пробоя.

Важным наблюдением, сделанным при эксперименте,



явилось обнаружение флуктуаций проводимости затвора облученных образцов, выражающихся в ступенчатом переключении между несколькими уровнями напряжения на диэлектрике (см. рис. 5). Переключения имеют случайный характер и в некоторых образцах могут достигать нескольких десятков вольт по амплитуде. В литературе данное явление носит название «случайный телеграфный сигнал» (далее – RTS) и для пробоев в МОП-структурах исследовано крайне слабо [25-27]. Следует отметить, что RTS обнаруживается в транзисторах только после облучения значительным (более  $10^6 \text{ см}^2$ ) флюенсом ТЗЧ, причем вне зависимости от наличия или отсутствия напряжений на стоке и затворе. Такой характер проявления эффекта позволяет связать его со структурной модификацией окисла при прохождении тяжелых ионов [28]. Одной из немногих гипотез, объясняющих феномен «телеграфного сигнала» при частичном пробое диэлектрика, является модуляция проводимости квантово-точечного контакта, связанная с процессом захвата и высвобождения электронов с глубоких ловушек на границе окисел-проводник, возникающих при облучении тяжелыми ионами [27].

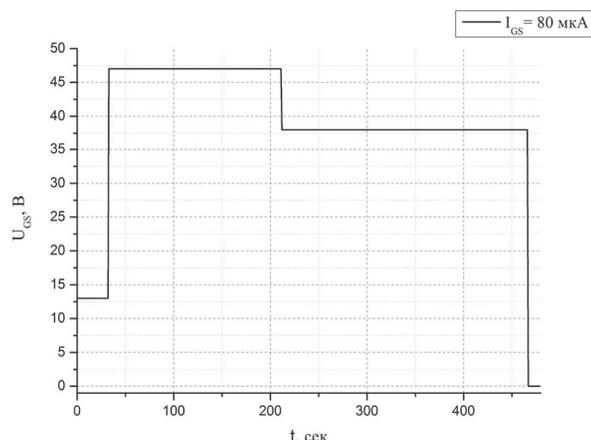


Рис. 5. Примеры сигнатуры типа «телеграфный сигнал» напряжения затвор-исток при приложении токовой нагрузки к подзатворному диэлектрику образцов МОП-транзисторов, облученных ТЗЧ.

Исходя из полученных результатов, можно условно разделить возникающие ЛД в оксиде на два вида: «тяжелые» дефекты, приводящие к необратимому пробоя при приложении электрической нагрузки сверх определенного порога, и «мягкие» ЛД, способные эволюционировать, в зависимости от приложенной электрической нагрузки, в SEGR, или же сохранить характер «мягкого пробоя».

Полученная картина динамики развития пробоя соответствует возникновению и разрастанию множественных каналов «микроробоев» по перколяционному механизму, хорошо освещенному в литературе [29]. При этом можно отметить, что благодаря проведению стресс-теста с использованием указанной процедуры удалось обнаружить наличие ЛД и в эталонных (необлученных) образцах.

С другой стороны, методика исследования в виде измерения  $Q_{BD}$  нуждается в дальнейшем усовершенствовании, т.к. результаты показывают, что измеренное значение заряда до пробоя имеет значительный (до двух порядков величины) разброс даже в пределах одной подвыборки образцов, и сильно зависит от тестового тока затвора. Интересно

качественное изменение наблюдаемых эффектов от «мягких пробоев» к «тяжелым» при увеличении флюенса частиц и переходе от углового к нормальному облучению. Можно предположить, что снижение вероятности наблюдения мгновенного «тяжелого пробоя» в образцах, подвергшихся дополнительному облучению, объясняется его маскированием участками окисла, имеющих «мягкий пробой». В самом деле, поскольку последний соответствует, как правило меньшему падению напряжения при одинаковом токе, то наличие единственного очага пробоя в исследуемом образце не дает напряжению повыситься до значения, необходимого для развития SEGR. Такая гипотеза позволяет оценить флюенс, при котором происходит образование «мягкого пробоя», на уровне порядка  $10^6 \text{ ион/см}^2$ .

В завершение этого раздела можно привести интегральные данные по распределению количества отказов в МОП-транзисторах при воздействии ТЗЧ, полученные при испытаниях, проведенных в Испытательной лаборатории ООО «НПЦ «Гранат» в течение 2015-2023 гг: SEGR – 40 %, SEB – 35 %, ЛД – 25 %.

### Заключение

Исходя из изложенного, можно сделать следующие предложения в регламент испытаний МОП-транзисторов на чувствительность к ТЗЧ:

- испытания допускается проводить только на моделирующих установках (ускорителях частиц). При этом все типы ИС, а также мощные МОП-транзисторы при использовании неотрицательных (для N-канала) запирающих потенциалов на затворе, как правило, нечувствительны к воздействию ВЭП, поэтому для подтверждения их стойкости к SEGR при эксплуатации в составе радиоэлектронной аппаратуры (далее – РЭА) КА достаточно испытаний на ускорителях ионов;

- PIGST проводить при напряжениях на затворе, соответствующих режиму эксплуатации конкретного изделия;

- отсутствие катастрофического отказа («тяжелого пробоя») при PIGST, вероятно, можно в некоторых случаях засчитывать как положительный результат испытаний (несмотря на превышение нормы по току утечки затвора);

- проведение испытаний МОП-транзисторов на стойкость к ТЗЧ в части обнаружения ЛД на отдельной выборке при пониженных значениях флюенса частиц (порядка  $10^3 \text{ см}^{-2}$ );

- облучение можно проводить только при нормальном падении ионов на поверхность кристалла при комнатной температуре окружающей среды;

- энергия ионов должна обеспечивать их проникновение на всю толщину эпитаксиального слоя, которую можно оценить при помощи формулы (1), с учетом толщины металлизации и прочих покрытий на кристалле. При этом наибольшая чувствительность к SEGR обеспечивается позиционированием пика Брэгга на границе эпислойа и подложки кристалла;

- выборка изделий для испытаний на SEGR должны составлять 10 шт. и более для набора приемлемой статистики событий.

Кроме того, можно дать следующие рекомендации разработчикам РЭА КА для снижения вероятности возникновения катастрофических отказов:

- снижение напряжения питания (для мощных МОП-транзисторов целесообразно использование трехкратного запаса по напряжению сток-исток относительно максимально допустимого по спецификации, а также использование неотрицательных (для N-канальных транзисторов) запирающих потенциалов на затворе);

- сокращение длительности и количества циклов записи в ИС запоминающих устройств, сопровождающихся повышением напряженности поля до значений, близких в пробойным.

### Литература

1. Чумаков А.И., «Действие космической радиации на интегральные схемы», М.: Радио и связь, 2004 г.
2. РД 134-0192-2011. Аппаратура радиоэлектронная бортовая космических аппаратов. Методы испытаний мощных МОП-транзисторов на стойкость к воздействию одиночных высокоэнергетических протонов и

- тяжелых заряженных частиц космического пространства на ускорителях заряженных частиц. 21 с.
3. РД В 319.03.58-2010. КСКК. Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые. Методы испытаний и оценки стойкости интегральных схем и мощных МДП-транзисторов по эффектам отказов от воздействия отдельных высокоэнергетичных тяжелых заряженных частиц и протонов космического пространства. 40 с.
4. J.T. Blandford, A.E. Waskiewicz, J.C. Pikel, "Cosmic ray induced permanent damage in MOS EAPROMs", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-31 (6), pp. 1568-1560, Dec.1984.
5. J.L. Titus, C.F. Wheatley, D.J. Burton, I. Mouret, M. Allenspach, J. Brews, R. Schrimpf, K. Galloway, R.L. Pease, "Impact of oxide thickness on SEGR failure in vertical power MOSFETs; development of a semi-empirical expression", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 42 (6), pp. 1928-1934, Dec.1995.
6. I. Mouret, M. Allenspach, R.D. Schrimpf, J.R. Brews, K.F. Galloway, "Temperature and angular dependence of substrate response in SEGR", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 41 (6), pp. 2216-2221, Dec.1994.
7. J.L. Titus et al, "Influence of ion beam energy on SEGR failure thresholds of vertical power MOSFETs", IEEE TNS, vol. 43, pp. 2938-2943, 1996.
8. G.K. Lum, H. O'Donnell, N. Boruta, "The impact of single event gate rupture in linear devices", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 47 (6), pp. 2373-2379, Dec.2000..
9. G. Swift, R. Katz, "An experimental survey of heavy ion induced dielectric rupture in Actel field programmable gate arrays", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 43, pp. 967-972, 1996.
10. G.M. Swift et al, "A new class of single event hard errors", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 41, No. 6, pp. 2043-2048, Dec.1994.
11. Митин Е.В. Пробой диэлектрика в МДП структурах при воздействии отдельных ядерных частиц. Петербургский журнал электроники 2013, № 2(75).
12. A.E. Waskiewicz, J.W. Groninger, V.H. Strahan, D.M. Long, "Burnout of power MOS transistors with heavy ions of 252-Cf", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-33 (6), pp. 1710-1713, 1986.
13. A. Luu et al, "SEB characterization of commercial power MOSFETs with backside laser and heavy ions of different ranges", IEEE TNS, vol. 55 (4), Aug. 2008.
14. D.L. Oberg, J.L. Wert, "First nondestructive measurements of power MOSFET single event burnout cross sections", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-34 (6), pp. 1736-1741, 1987.
15. S. Kuboyama, et.al., "Single event burnout of power MOSFETs caused by nuclear reactions with heavy ions", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 41 (6), p. 2210, Dec. 1994.
16. R. Koga, S.H. Crain, K.B. Crawford, P. Yu, M.J. Gordon, "Single event burnout sensitivity of embedded field effect transistors", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 46(6), pp. 1395-1402, Dec.1999.
17. J.L. Titus, C.F. Wheatley, "Experimental studies of single-event gate rupture and burnout in vertical power MOSFETs", IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 43 (2), p. 533, Apr.1996.
18. Митин Е.В., Семенчуков П.В. Особенности возникновения латентных дефектов в подзатворном диэлектрике

- МОП транзисторов при облучении тяжелыми ионами. Петербургский журнал электроники 2016, № 1(84).
19. Contribution of Latent Defects Induced by High-Energy Heavy Ion Irradiation on the Gate Oxide Breakdown / M. Marinony [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. Vol. 56, № 4. P. 2213.
  20. Post-Irradiation-Gate-Stress on Power MOSFETs: Quantification of Latent Defects-Induced Reliability Degradation / A. Privat [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. Vol. 60, № 6. P. 4166.
  21. Impact of Single Event Gate Rupture and Latent Defects on Power MOSFETs Switching Operation / A. Privat [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. Vol. 61, № 4. P. 1856.
  22. Митин Е.В., Громов П.Ю., Козюков А.Е., Лоскот А.И., «Исследование подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов, облученных тяжелыми ионами», ВАНТ 2019, вып. 3, стр. 19.
  23. Митин Е.В., Семенчуков П.В., Иванов Н.А.. Исследование особенностей возникновения латентных дефектов в подзатворном диэлектрике МОП-транзисторов при воздействии тяжелых заряженных частиц. ВАНТ 2017.
  24. B.K. Choi et al, "Long-term reliability degradation of ultrathin films due to heavy ion irradiation", IEEE TNS, vol. NS-49, No. 6, pp. 3045-3050, Dec. 2002.
  25. O. Briere et al, "Random telegraph signal in the quasi-breakdown of MOS capacitors", Proc ESSDERC'96, 1996. p. 759 – 762.
  26. A. Cester et al, "Noise characteristics of radiation-induced soft breakdown current in ultrathin gate oxides", IEEE TNS, vol. 48, No. 6, Dec. 2001.
  27. A. Cester et al, "Soft breakdown current noise in ultra-thin gate oxides", Solid-State Electronics, 46 (2002), pp. 1019-1025.
  28. High-Energy Heavy Ion Irradiation-Induced Structural Modifications: A Potential Physical Understanding of Latent Defects / M. Marinoni [et al.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. Vol. 55, № 6. P. 2970 – 2974.
  29. J.H. Stathis, "Percolation models for gate oxide breakdown", J.Appl.Phys., vol. 86, No. 10, pp. 5757-5766, 1999.

УДК 006.91

**ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕСТАНДАРТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
(ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ) В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ISSUES OF METROLOGICAL SUPPORT OF NON-STANDARD TEST EQUIPMENT  
(TEST BENCHES) IN THE DEVELOPMENT PROCESS AT ENTERPRISES  
OF THE RADIOELECTRONIC INDUSTRY**

**Быканов В.В.**, к. т. н., с. н. с., **Есакова М.М., Тупицина А.В.,  
Кремнева А.В., Косач А.С.** ФГБУ «ВНИИР», +7 (903) 774-25-07, sertifbv@yandex.ru  
**Vukanov V.V.**, Ph. D. of engineering sciences, Senior Researcher Officer, **Esakova M.M., Tupitsina A.V.,  
Kremneva A.V., Kosach A.S.** FSBI «VNIIR», +7 (903) 774-25-07, sertifbv@yandex.ru

**Аннотация.** В настоящее время метрологи и разработчики изделий ЭКБ сталкиваются с неоднозначностью в вопросах аттестации нестандартного испытательного оборудования. В статье проведен анализ состояния проблемы и рассмотрены наиболее практические варианты оценивания показателей точности измерений параметров при аттестации нестандартного испытательного оборудования.

**Annotation.** At present, metrologists and developers of ECB products face ambiguity in the issues of attestation of non-standard test equipment. The article analyzes the state of the problem and considers the most practical options for assessing the accuracy of measurement parameters during the certification of non-standard test equipment.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, испытания, техническая документация, электронная компонентная база, испытательное оборудование, метрологическая экспертиза, испытательный стенд, аттестация, погрешность измерений, неопределенность измерений.

**Keywords:** metrological support, tests, technical documentation, electronic component base, test equipment, metrological expertise, test stand, attestation, measurement error, measurement uncertainty.

### Введение

Испытания электронной компонентной базы (далее – ЭКБ) и радиоэлектронной аппаратуры (далее – РЭА) – важный и сложный процесс получения информации о характеристиках объекта, являющийся основой объективной оценки технического уровня и качества испытуемых изде-

лий на всех стадиях жизненного цикла. Согласно ГОСТ 16504-81 – испытание – это экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик ЭКБ и РЭА, как результата воздействия на него при его функционировании [1]. Определение включает оценивание и контроль как параметров, воздействующих на ЭКБ

и РЭА, так и изменения качественных и количественных свойств разрабатываемой ЭКБ и РЭА.

Условием получения достоверной информации с гарантируемой оценкой точности о характеристиках испытуемых ЭКБ и РЭА является применение испытательного оборудования (далее – ИО), предназначенного для воспроизведения условий испытаний [2]. В «испытательное оборудование» включают и такое понятие, как «испытательный стенд» (далее – ИС). При стендовых испытаниях ЭКБ и РЭА подвергаются воздействию нагрузок, приближенных или превышающих нагрузки в реальных условиях эксплуатации. Целью подобных испытаний является выяснение реакции ЭКБ и РЭА на нагрузки и определение их допустимых значений. Условия испытаний могут быть как близкими к реальным условиям эксплуатации ЭКБ и РЭА, так и специфическими. Преимуществом испытаний на стенде перед другими видами испытаний является возможность оценки реакции образцов ЭКБ и РЭА на определенный тип и величину нагрузки при прочих фиксированных параметрах, что позволяет выявить скрытые конструктивные недостатки. Кроме того, стендовые испытания в большинстве случаев являются менее затратными в финансовом плане.

Обычно, в процессе создания ИО (ИС) на предприятии разрабатывается паспорт одновременно с конструкторской документацией, составляется спецификация средств измерений, необходимых для размещения на стенде. Затем на стадии технического проектирования проводится метрологическая экспертиза технической документации [3, 4]. Задача метролога-эксперта – выявить ошибочные или недостаточно обоснованные решения и выработать наиболее рациональные по конкретным вопросам метрологического обеспечения. Метролог должен иметь ввиду следующие вопросы метрологического обеспечения разрабатываемого оборудования: что измерять, с какой точностью, какими средствами и по каким методикам. После сборки, опробования и проведения приемосдаточных испытаний отдел метрологии разрабатывает методику и программу аттестации ИО (ИС) и отправляет документы на экспертизу в уполномоченный на это орган.

После утверждения всех сопутствующих документов проводится первичная аттестация ИО (ИС) по [5] для применения в гражданских целях и ГОСТ РВ 0008-002-2013 для применения в сфере обороны и безопасности. Целью первичной аттестации является определение действительных значений характеристик ИО (ИС), их соответствия требованиям нормативных документов, установления пригодности к воспроизведению условий испытаний в пределах допустимых отклонений и использования ИО (ИС) в соответствии с его назначением [3]. Первичная аттестация включает в себя контроль параметров, характеризующих условия проведения аттестации, определение точностных характеристик ИО (ИС).

ИО подвергают процедуре аттестации в соответствии с требованиями национальных стандартов, в результате которой определяется его пригодность к применению при испытаниях ЭКБ и РЭА. Согласно требованиям стандартов, процедура аттестации должна включать в себя следующие мероприятия:



*Косач А.С., Кремнева А.В., Быканов В.В.,  
Есакова М.М., Тупицина А.В.*

- разработку проектов программ и методик аттестации ИО;
- метрологическую экспертизу проектов программ и методик аттестации (или разработку программ и методик аттестации – по решению Заказчиков);

- согласование и утверждение программы и методики аттестации при положительных результатах метрологической экспертизы;

- исследование основных точностных характеристик ИО;
- оформление соответствующих документов по результатам исследования характеристик, а именно протокола аттестации и аттестата об аттестации ИО (при положительных результатах работ). Действующим законодательством установлены определенные требования к организации и порядку проведения метрологической экспертизы, но стоит отметить, что при этом проекты программ и методик аттестации (далее – ПМА) ИО могут разрабатываться на территории любого предприятия, эксплуатирующего ИО, при наличии специалистов, владеющих навыками и знаниями в данной области. Критерии оценки, разрабатываемой ПМА приведены на рис.1 [6].

Следует отметить важный момент, который необходимо учитывать при принятии решения об аттестации оборудования. Аттестации подлежит только ИО (ИС), применяемые при испытаниях ЭКБ и РЭА. Если оборудование используется в технологическом процессе производства ЭКБ и РЭА, оно аттестации не подлежит. Такое оборудование должно регулярно подвергаться проверке на технологическую точность в соответствии с [7, 8]. Процедура метрологического обеспечения (далее — МО) в процессе создания ИО (ИС) представлена на рис. 2.

В процессе разработки методики аттестации основное внимание уделяется точностным характеристикам ИО (ИС), показатели точности измерений которых регламентируются характеристиками погрешности или неопределенности измерений.

В настоящее время в метрологии используют два основных подхода при определении и выражении точности измерений.

Первый подход – традиционный, когда для точности измерений используется понятие погрешности результата измерений как разности между результатом измерений и



истинным (действительным) значением измеряемой величины. Соответственно анализ погрешностей является существенным моментом такого подхода. При этом процедура оценивания погрешности подразумевает оценивание ее характеристик (рис.3).

Другой, относительно новый, подход базируется на понятии неопределенности измерений. Следует отметить, что введение в метрологию термина «неопределенность» привело не столько к появлению каких-то новых аналитических выражений и вычислений, сколько к изменению общего взгляда на то, что такое измерение. Измерение (величин) – это процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине [2]. Если совсем недавно процесс измерения воспринимался исключительно как сравнение с единицей величины, то есть с эталоном, то теперь – это совокупность любых операций, которые приводят к какому-то значению. Такая трансформация понятий естественна, т.к. сегодня для многих измерений вообще не существует эталонов (в частности, в информационных технологиях, медицинских и биологических исследованиях и пр.). Следствием этих фундаментальных исследований стал постепенный отказ от применения термина «погрешность измерений», представляющим разность между измеренным значением величины и опорным значением величины [2]. Опорное значение величины заранее известно, т.к. определяется в процессе поверки средства измерений. Но при натуральных измерениях опорное значение неизвестно, поэтому и говорить о погрешностях в этих случаях весьма проблематично.

В настоящее время всё больше внимание уделяется неопределённости измерения, хотя в старых методиках аттестации ИО применен расчёт погрешности в качестве основного показателя точности измерений. Представляется интересным проведение анализа применения теории погрешностей и неопределенности измерений при аттестации ИО (ИС).

Согласно теории погрешностей за точность измерений можно взять близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины. То есть, чем ближе измеренное значение к истинному, тем точнее это измерение. Так же точность может быть выражена обратной величиной модуля относительной погрешности. Чем выше точность, тем меньше все виды погрешности. Согласно [9] установлены следующие показатели точности измерений:

- интервал, в котором погрешность измерения находится с заданной вероятностью (интервальная характеристика);

- среднее квадратическое отклонение погрешности (точечная характеристика) [9].

В случае применения неопределенности измерений (неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации), в [2] установлены следующие показатели точности измерений:

- расширенная неопределенность измерений для заданной вероятности (интервальная характеристика) измерений;

- суммарная стандартная неопределенность измерений (точечная характеристика) [6].

Следует отметить, что в настоящее время для аттестации нестандартного ИО (в частности определения действительных значений коэффициента безэховости в безэховых камерах (далее – БЭК) в СВЧ диапазоне) применяются высокоточные средства измерений (далее – СИ) с цифровой обработкой измерительной информации. При применении таких СИ с погрешностями измерений, близкими к эталонным, возможно использовать результаты определения точностных характеристик нестандартного ИО непосредственно с монитора СИ.

Оценку точностных характеристик ИО с применением теории погрешности и неопределенности измерений проведем на примере аттестации климатической камеры тепла, холода и влаги SH-662.

По методике аттестации погрешность измерения температуры в зависимости от температуры составляет от минус 60 до 100 ±2 °С и от 100 до 150 ±5 °С. При расчёте влажности допустимая погрешность составляет ±3 %.

Данные погрешности рассчитываются через точечные характеристики погрешности – среднеквадратические отклонения погрешности по следующим зависимостям (данное отклонение определяется для каждого датчика с доверительной вероятностью в 95 %):

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{k} * \sum_1^k (\bar{t}_j - t_{ij})^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{влj} = \sqrt{\frac{1}{k} * \sum_1^k (\bar{\eta}_j - \eta_{ij})^2}, \quad (2)$$

где:  $\sigma_j$  – среднеквадратическое отклонение от средних значений температуры;

$\sigma_{влj}$  – среднеквадратическое отклонение от средних значений влажности;

$\bar{t}_j$  – среднее значение температуры в j-ой точке;

$\bar{\eta}_j$  – среднее значение влажности в j-ой точке;

$k$  – число измерений;

$t_{ij}$  – значение температуры определяемое в j-й точке при i-ом измерении;

$\eta_{ij}$  – значение влажности определяемое в j-й точке при i-ом измерении.

Так же погрешность рассчитывается через отклонение достигнутого от заданного и имеет вид:

$$\Delta t = t_{\delta} - t_{\varepsilon}, \quad (3)$$

$$\Delta \eta = \eta_{\delta} - \eta_{\varepsilon}, \quad (4)$$

где:  $\Delta t$  – отклонение достигнутого значения температуры;

$\Delta \eta$  – отклонение достигнутого значения влажности;

$t_{\delta}$  – достигнутое значение температуры;

$t_{\varepsilon}$  – заданное значение температуры установленное на контроллере;

$\eta_{\delta}$  – достигнутое значение влажности;

$\eta_{\varepsilon}$  – заданное значение влажности установленное на контроллере.

Для примера возьмём одну температуру равную 50 °С и влажность 40 %.

Согласно методике периодической аттестации, полученные результаты отражены в таблицах 1-4:

Таблица 1. Среднеквадратическое отклонение температуры

№ датчика	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sigma_j$	0,16	0,01	0,02	0,0	0,16	0,01	0,11	0,00

Таблица 2. Среднеквадратическое отклонение влажности

№ датчика	1	2	3
$\sigma_{влj}$	0,27	0,27	0,21

Таблица 3. Полученные значения температуры

№ п/п	Наименование характеристик	Значения нормированных характеристик
	Заданная температура, °С	50
1	Достигнутое значение температуры при аттестации, °С	50,05
2	Градиент температуры (неравномерность распределения) в полезном объеме камеры, °С	0,82
3	Отклонение температуры от заданного значения, °С	0,5

Таблица 4. Полученные значения относительной влажности

№ п/п	Наименование характеристик	Значения нормированных характеристик
	Заданная влажность, %	40
1	Достигнутое значение относительной влажности при аттестации, %	39
2	Отклонение относительной влажности от заданного значения, %	-1

Расчёты с применением теории погрешности показали, что погрешность и отклонение находятся в пределах допустимых норм.

Ниже приведены расчёты погрешности с помощью неопределённости измерения.

Неопределённость измерения определяется следующим образом:

**1. Оценивание стандартной неопределенности по типу А – это получение статистических оценок на основе результатов ряда измерений**

Оценивание стандартной неопределенности по типу А применяется, когда имеются результаты независимых измерений одной из входных величин в количестве  $n > 10$ . Для этого проверяется наличие грубых промахов по нижеприведенному алгоритму.

Расчет среднего арифметического значения полученных  $n$  – результатов измерений:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n X_{iq}, \quad (5)$$

Расчет стандартного отклонения результатов измерений от среднего арифметического:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (6)$$

Для источников неопределенности случайного характера вычисляем неопределенность по типу А:

$$U_A = \frac{S}{n * (n - 1)}, \quad (7)$$

Оценивание неопределенности измерений по типу В – это получение оценок на основе априорной нестатистической информации.

При выполнении однократного измерения или, если

измерений  $n < 10$ , неопределенность измерений определяется по типу В.

Неопределенность измерений по типу В обусловлена инструментальной погрешностью СИ, применяемого при измерении. Погрешность применяемого при измерении СИ, берется из описания типа СИ (эталона), предоставленного изготовителем СИ.

Остальными случайными погрешностями (влияние окружающей среды, опыт испытателя) пренебрегаем.

Для источников неопределенности систематического характера (приборная погрешность) вычисляем неопределенность по типу В:

$$U_B = \sqrt{\frac{\Delta E}{\sqrt{3}}}, \quad (8)$$

где:  $\Delta E$  – погрешность прибора, с учетом среднего значения измерений.

Так же, при однократном измерении или если их количество  $n < 10$ , допускается расчет неопределенности только по типу В, в таком случае, формула расчета неопределенности по типу В будет выглядеть следующим образом:

$$U_{B1} = \sqrt{\frac{\bar{X}}{\sqrt{3}}}, \quad (9)$$

где:  $\bar{X}$  – среднее измеренное значение.

**2. Оценивание суммарной стандартной неопределенностью измерений**

Полученные составляющие неопределенности измерений по типу А и В формируют суммарную стандартную неопределенность, определяющуюся по формуле:

$$U_C = \sqrt{c_i^2 * U_A^2 + c_i^2 * U_B^2}, \quad (10)$$

где:  $c$  – коэффициент чувствительности.

Коэффициент чувствительности рассчитывается для косвенных измерений как частные производные функции:

$$c_i = -\frac{\Delta E}{\sqrt{3}} * 100, \quad (11)$$

При прямых измерениях коэффициент чувствительности  $c_i = 1$ .

При однократном измерении или если их количество  $n < 10$  расчет суммарной стандартной неопределенности производится только по типу В. В таком случае формула будет выглядеть следующим образом:

$$U_C = \sqrt{c_i^2 * U_B^2 + c_i^2 * U_{B1}^2}, \quad (12)$$

### 3. Оценивание расширенной неопределенностью измерений

Расширенная неопределенность измерений при измерении определяется по формуле:

$$U = kU_C, \quad (13)$$

где:  $k$  коэффициент охвата.

Для нормального распределения результатов измерений при вероятности  $P = 0,95$  коэффициент охвата равен 2.

### 4. Оценивание итогового результата измерений

В соответствии с определением, неопределенность – это параметр, связанный с результатом измерений « $y$ » и характеризующий разброс значений, которые можно обоснованно приписать измеряемой величине « $Y$ ».

Форма записи результата измерения имеет вид:

$$Y = y \pm U, \quad p = 0,95, \quad (14)$$

Из выражения видно, что вероятный разброс значений « $Y$ » находится в диапазоне  $\pm U$  относительно результата измерения « $y$ » (рис. 4), а степень обоснованности нахождения значений « $Y$ » в этом интервале определяется вероятностью (уровнем доверия)  $p = 0,95$ .

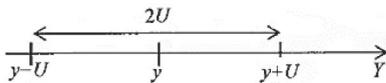


Рис. 4. К определению неопределенности измерения

При использовании конкретного метода, для которого неопределенность результатов измерений уже была установлена и подтверждена, отсутствует необходимость оценивать неопределенность измерений для каждого результата, если лаборатория может продемонстрировать, что выявленные критические факторы, оказывающие влияние, находятся под контролем.

Результаты оценки соответствия произведенных расчетов приводятся в конце вычислений для утверждения соответствия, несоответствия или неокончательной оценки.

Решение о соответствии принимается в случае, если интервал неопределенности результатов измерений находится внутри области допустимых значений.

Решение о соответствии должно быть сформулировано следующим образом: оценка соответствия продемонстрировала, что значение контролируемого параметра соответствует требованиям.

Решение о несоответствии принимается в случае, если интервал неопределенности результатов измерений находится внутри области недопустимых значений.

Решение о несоответствии должно быть сформулировано следующим образом: оценка соответствия продемонстрировала, что значение контролируемого параметра не соответствует требованиям.

В случае, если критические факторы оказывают влияние и невозможно принять решение, результат оценки соответствия является неокончательным.

Результат неокончательной оценки должен иметь следующую формулировку: оценка соответствия не способна продемонстрировать, что значение контролируемого параметра соответствует или не соответствует требованиям.

Проведем измерения (температура 50 °С и влажность 40 %), при аттестации камеры тепла, холода и влаги SH-662 (см. табл. 5 и 6).

Таблица 5. Результаты измерений температуры

k=2	p=0,95	T=50						
$\Delta E =$	0,00450	0,00451	0,00450	0,00450	0,00450	0,00450	0,00450	0,00450
S=	0,16029	0,01357	0,02380	0,24462	0,05771	0,16157	0,00830	0,11474
U(A)=	0,00018	0,00002	0,00003	0,00028	0,00007	0,00019	0,00001	0,00013
U(B)=	0,05099	0,05101	0,05100	0,05098	0,05098	0,05099	0,05097	0,05100
c=	-0,1501	-0,15021	-0,15016	-0,15008	-0,15008	-0,15012	-0,15000	-0,1501
Uc=	0,02165							
D(a)=	0,01%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
D(b)=	12,50%	12,52%	12,51%	12,49%	12,49%	12,50%	12,47%	12,51%
U=	0,043							

Полученный результат измерений температуры имеет вид:  $Y = 50,050 \pm 0,043$ ;  $p = 0,95$ .

Вероятный разброс значений « $Y$ » находится в диапазоне  $\pm 0,043$  относительно результата измерений 50,050, а

степень обоснованности нахождения значений « $Y$ » в этом интервале определяется вероятностью  $p = 0,95$ .

Оценка соответствия продемонстрировала, что значение контролируемого параметра соответствует требованиям.

Таблица 6. Результаты измерений влажности

k=2	p=0,95	Π=40%
ΔE(T)=	0,00430	0,00430
ΔE(Π)=	0,01	
S(T)=	0,047946	0,037905
S(Π)=	0,16682	0,15466
UT(A)=	0,00019	0,00018
UT(B)=	0,04981	0,04980
UΠ(A)=	0,00006	0,00004
UΠ(B)=	0,07598	
c(T)=	-0,14322	-0,14319
c(Π)=	1,00000	
Uc=	0,07698	
Da(T)=	0,00%	0,00%
Da(Π)=	0,00%	0,00%
Db(T)=	0,86%	0,86%
Db(Π)=	97,42%	
U=	0,154	0,40%

Полученный результат измерений влажности имеет вид:  $Y = 39,000 \pm 0,154$ ;  $p = 0,95$ .

Вероятный разброс значений «Y» находится в диапазоне  $\pm 0,154$  относительно результата измерений

39,000, а степень обоснованности нахождения значений «Y» в этом интервале определяется вероятностью  $p = 0,95$ .

Оценка соответствия точностных характеристик ИО с помощью неопределенности измерений продемонстрировала, что значение контролируемого параметра соответствует требованиям, изложенным в методике аттестации.

Проведем периодическую аттестацию нестандартизованного ИО на примере разработанной ФГУП «МНИИ-РИП» безэховой камеры из состава комплекса для антенных измерений ББПКС.001.18-70.

Целью периодической аттестации БЭК является определение действительных значений коэффициента безэховости для подтверждения возможности воспроизводимости условий испытаний радиотехнических систем.

Основная точностная характеристика, определяемая при аттестации данного испытательного оборудования безэховости камеры, измеряется при помощи поверенного средства измерения утвержденного типа: анализатор цепей векторный Anritsu MS4647B, имеющего метрологические характеристики, представленные в таблице 7.

Таблица 7. Характеристика основного СИ для проведения аттестации

Название СИ	Диапазон измерений	Класс точности, погрешности измерений
Анализатор цепей векторный Anritsu MS4647B № гос. реестра (58546-14)	до 70 ГГц (в коаксиальном тракте; 75 – 110 ГГц (в волноводном тракте)	$\pm 5 \cdot 10^{-7}$

Рекомендуемые метрологические и точностные характеристики по программе первичной, (периодической, повторной) аттестации (далее – ПМА) представлены в таблице 8.

Таблица 8. Рекомендуемые метрологические и точностные характеристики по ПМА

Анализатор электрических цепей векторный	Диапазон частот от 18,0 до 70 ГГц Пределы допускаемой погрешности измерений модуля коэффициента передачи $\pm 1,0$ дБ.
--	---

Результаты Аттестации БЭК представлены на рис. 5–8.



Рис. 5. Пространственный спектр сумм измеренных сигналов в диапазоне от 18 до 26,5 ГГц

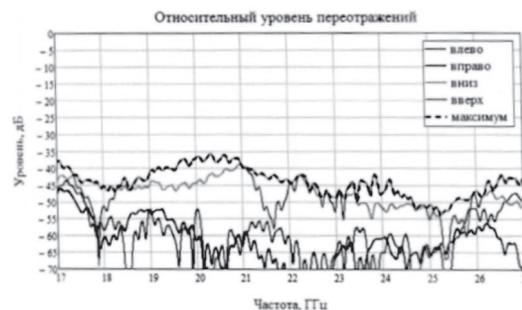


Рис. 6. Относительные уровни переотраженных сигналов в диапазоне частот от 18 до 26,5 ГГц

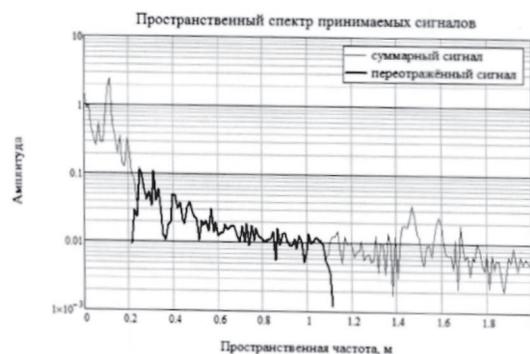


Рис. 7. Пространственный спектр сумм измеренных сигналов в диапазоне частот от 50 до 70 ГГц

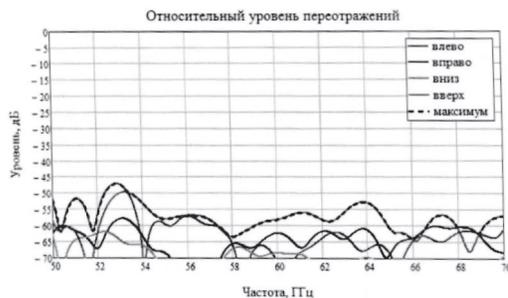


Рис. 8. Относительные уровни переотраженных сигналов в диапазоне от 50 до 70 ГГц

Анализ данных измерений показывает соответствие измерений точностным характеристикам, согласно ПМА.

Полученный разброс значений входит в допуски ПМА, соответственно отсутствует необходимость математического расчета.

### Заключение

По условиям, определяющих точность результата, измерения можно разделить на два класса:

– измерения максимально возможной точности, достигаемой при существующем уровне техники, в частности, эталонные измерения, связанные с максимальной возможной точностью воспроизведения единиц величин, измерения физических констант, некоторые специальные измерения, требующие высокой точности. В данном случае при аттестации целесообразно применять неопределенность измерений;

– контрольно-поверочные (метрологические измерения), в которых погрешность определяется с определенной вероятностью, не превышающая некоторое заданное значение, выполненное такими средствами измерений и по таким методикам, которые гарантируют заданную погрешность. Следовательно, в соответствии с [11] измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования, нужно проводить с использованием математического аппарата расчета погрешности измерений.

Замена понятия «погрешность» на «неопределенность» не способствует заметному упрощению процедуры оценивания показателей точности, т.к. нахождение неопределенности результата измерений почти не отличается от общепринятого оценивания показателей погрешности измерения. Поэтому в задачах измерений в процессе аттестации ИО(ИС), когда представляет интерес та или иная характеристика случайной величины – отклонения результата измерения от истинного значения измеряемой (атте-

стнуемой) величины, нет ни практических, ни теоретических причин отказываться от традиционного, удобного, широко распространенного термина «погрешность измерений».

Следует отметить, что анализ соответствия оцениваемых параметров, в том числе оценка оптимальности требований точности измерений, проводится в процессе метрологической экспертизы технической документации разрабатываемого ИО(ИС). Только в этом случае можно говорить о правильности установления, применения и соблюдения метрологических требований, правил и норм в области обеспечения единства измерений.

### Литература

1. ГОСТ 16504 «Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения».
2. РМГ 29-2013 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения».
3. ГОСТ РВ 0008-003-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза вооружения и военной техники. Организация и порядок проведения».
4. ГОСТ Р 8.1024-2023 «ГСИ. Метрологическая экспертиза технической документации. Основные положения».
5. ГОСТ Р 8.568-2017 «ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения».
6. Алимов С.С. Из опыта разработки программ и методик аттестации испытательного оборудования.
7. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования».
8. ГОСТ РВ 0015-002-2020 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Требования».
9. МИ 1317-2004 «Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров».
10. ГОСТ 34100.3-2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения».
11. Постановление Правительства РФ от 16 ноября 2020 г. № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений».

**КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ  
СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТРАБОТКИ СРЕДСТВ ВЫВЕДЕНИЯ**  
**CONCEPT OF DEVELOPMENT OF INFORMATION AND TELEMETRY SUPPORT SYSTEMS  
FOR DEVELOPMENT OF LAUNCH VEHICLES**

**Воронцов В.Л.**, к. т. н., АО «Российские космические системы», a762642@yandex.ru;

**Давыдов И.А.**, к. т. н., АО «Научно-производственное объединение измерительной техники», Davydov\_I@npoit.ru

**Vorontsov V.L.**, Candidate of Sciences (Engineering), AO Russian Space Systems, a762642@yandex.ru;

**Davydov I.A.**, Candidate of Sciences (Engineering), AO Measuring Equipment Research and Production Association,  
Davydov\_I@npoit.ru

**Аннотация.** Настоящая статья относится к научно-методическому обеспечению процесса развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения (далее – СИТО<sub>СВ</sub>). Её содержание является результатом обобщения прошлых работ по тематике развития СИТО<sub>СВ</sub>. Предполагается, что материал статьи ляжет в основу официальной Концепции развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения (далее – Концепция). Для упрощения процесса трансформации настоящей статьи в проект Концепции и – далее – в официальную Концепцию, статья построена таким образом, чтобы указанные в ней ссылки на источники литературы заменить ссылками на соответствующие Приложения Концепции с пояснениями, содержание которых соответствует вышеупомянутым источникам литературы. При формулировании положений Концепции с целью обеспечения их лаконичности целесообразно рассмотреть и реализовать возможности переноса некоторых (уместных) фрагментов настоящей статьи в Приложения Концепции.

**Abstract.** This paper refers to the scientific and methodological support for development of information and telemetry support systems for development of launch vehicles (ITSS<sub>LV</sub>). Its content is a result of summarization of past work in the area of ITSS<sub>LV</sub> development. It is expected that the paper material will form the basis of an official Concept of development of information and telemetry systems for development of launch vehicles (hereinafter referred to as the Concept). To simplify the process of transforming this paper into a draft Concept and further into an official Concept, the paper is structured in a way that will allow replacing the literature source references in the paper with references to the relevant Concept Annexes with explanations. The content of the Annexes will correspond to the above-mentioned literature sources. When formulating the Concept provisions, it is advisable to consider and implement the possibility of putting some (relevant) fragments of the paper into the Annexes of the Concept to ensure the provision conciseness.

**Ключевые слова:** информационно-телеметрическое обеспечение, программно-технические средства, система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения, телеметрируемый объект, телеметрическая информация, телеметрический комплекс космодрома.

**Keywords:** information and telemetry support, software and hardware facilities, information and telemetry support system for development of launch vehicles, telemetered object, telemetry information, telemetry complex of a cosmodrome.

### Введение

Потребность в Концепции развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения (далее – Концепция) обусловлена необходимостью существенного улучшения управления развитием отечественных систем регламентированием процесса их развития. Сущности этого регламентирования на концептуальном уровне описаны в настоящей статье. Статья построена таким образом, чтобы максимально упростить её трансформацию в проект Концепции и – далее – в официальную Концепцию.

### Основная часть

#### 1. Актуальность разработки настоящей Концепции

Актуальность разработки настоящей Концепции связана со значительными отличительными особенностями сущностей информационно-телеметрического обеспечения



Воронцов В.Л.



Давыдов И.А.

(далее – ИТО) отработки средств выведения, по сравнению, например, с космическими аппаратами, которая заключается в следующем [1, 2]:

– большая доля виброизмерений даже по окончании лётных испытаний и связанное с ними использование аналоговых методов передачи телеметрической информации (далее – ТМИ) по каналам «борт-Земля»;

– значительная неопределённость диапазона измерений телеметрируемых параметров и (как следствие) потери ТМИ из-за ошибок в его выборе;

– относительно большой риск полётной аварии с разрушением конструкции изделия;

– значительные искажения телеметрического радиосигнала, передаваемого по каналам «борт-Земля», из-за влияния факела, плазмы, и как следствие – разнесение каналов (в том числе в пространстве, с использованием приёмных антенн, размещённых на нескольких измерительных пунктах) для обеспечения необходимой для практики достоверности ТМИ.

Соответственно, актуальна *система* стандартов телеметрии, отвечающая требованиям вышеупомянутой Концепции, построенная с учётом особенностей ИТО отработки средств выведения.

## 2. Актуальность регламентирования процесса развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения

Показано [1, 3], что наиболее зримо недостатки существующей общей отраслевой научно-технической политики развития средств ИТО отработки средств выведения проявляются в отсутствии системного и доминировании субъективного и фрагментарного подходов, вследствие чего программно-технические средства (далее – ПТС) телеметрического комплекса космодрома (далее – ТК) избыточны, но не инвариантны к текущим задачам ИТО. При этом потери информации при пусках ракет вследствие влияния вредных факторов разной природы сопоставимы с потерями времён 60-70-х годов 20-го века.

Показано [1], что для существующих систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения (далее – СИТО<sub>СВ</sub>) характерно увеличение количества телеизмерений при увеличении количества *телеметрируемых параметров* (далее – ТМП) [4]. При этом происходит пропорциональное увеличение количества комплектов БРТС (соответственно увеличивается суммарная скорость передачи ТМИ с выходов БРТС) и лавинообразное – количества ПТС ТК (из-за необходимости разнесённого приёма ТМИ). Имеет место значительный разброс объёмов получаемой ТМИ в зависимости от сущностей *телеметрируемых объектов* [4], что создаёт значительную избыточность ПТС ТК [1].

Искомый результат развития СИТО<sub>СВ</sub>:

– построение компактного ТК, инвариантного по отношению к изменяющимся задачам ИТО;

– обеспечение подключения к ТК внешних программно-технических средств для расширения его возможностей;

– *существенное* сокращение потерь телеметрической информации, обеспечение требуемой оперативности решения задач ИТО, уменьшение материальных затрат на решение задач ИТО;

– обеспечение безопасности передачи телеметрической информации.

Необходимое условие построения относительно компактного ТК, инвариантного к изменяющимся задачам ИТО – существенное замедление роста суммарной

скорости передачи данных телеизмерений по каналам «борт-Земля», сокращение количества каналов разнесения при увеличении количества ТМП. При этом нужно *существенно* сократить потери ТМИ.

В этих условиях актуален системный подход и, соответственно, регламентирование процесса развития отечественных СИТО<sub>СВ</sub>. Основными инструментами регламентирования являются официальная концепция развития СИТО<sub>СВ</sub> и соответствующая ей система стандартов телеметрии.

Обосновано [1], планируемые сроки конкретных операций по усовершенствованию СИТО<sub>СВ</sub> не должны быть большими, предварительные исследования – трудоёмкими, а сроки их проведения – растянутыми. От замысла до практического осуществления стратегии усовершенствования должно быть не более двух лет [1].

Концепция развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения разработана с целью совершенствования процесса развития систем СИТО<sub>СВ</sub> путём его регламентирования, обеспечивающего согласованные перманентные действия предприятий/организаций ракетно-космической отрасли (далее – РКО), а также заинтересованных предприятий/организаций вне РКО.

## 3. Термины и определения

Система СИТО<sub>СВ</sub> – это располагаемые материально-технические, стоимостные, временные, людские и другие ресурсы, которыми может воспользоваться оперирующая сторона (в том числе исследователь операции) для достижения цели операции, относящейся к решению задач ИТО отработки средств выведения [1, 3] (см. «*Активные средства*» в гл. 4 [5]).

К средствам выведения относятся прежде всего ракеты-носители (далее – РН) и разгонные блоки (далее – РБ) ракет космического назначения (далее – РКН). Они являются *телеметрируемыми объектами* [4].

*Измерительный комплекс космодрома* (далее – ИКК) [1] – совокупность программно-технических средств и сооружений измерительных пунктов и вычислительного центра, в которых они размещены, предназначенных для получения и обработки информации о функционировании систем *средств выведения* и контроля их движения на участке выведения (см. «*Измерительный комплекс космодрома*» [6]).

*Телеметрический комплекс* (ТК) является частью ИКК и предназначен для решения задач ИТО отработки, прежде всего, РКН. ПТС, являющиеся элементами СИТО<sub>СВ</sub>, входящие в его состав, размещены на измерительных пунктах (на ИПах) и в вычислительном центре (далее – ВЦ) космодрома, причём наиболее сложные задачи обработки ТМИ решаются в ВЦ [1].

При проведении пуска определяют *комплекс средств измерений, сбора и обработки информации ракетно-космического комплекса* (далее – КСИСО) [6], являющихся частью ИКК (и, соответственно, частью ТК). Определяют также элементы СИТО<sub>СВ</sub> для решения отдельных задач ИТО – КСИСО ТМИ [1].

Процесс развития СИТО<sub>СВ</sub> является целенаправленной последовательностью операций по их усовершенствованию и мер по улучшению условий выполнения этих операций.

*Операция* – совокупность действий, мероприятий, направленных на достижение некоторой цели, т.е. совокупность целенаправленных действий [5]. Применительно к технике – взаимодействие технических средств и людей.

Операция усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub> выполняется с определённой целью, в установленные сроки и в пределах установленных допустимых материальных затрат. Каждая операция усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub> из вышеупомянутой последовательности операций выполняется в соответствии с выбранной стратегией.

*Стратегия операции усовершенствования (применения) СИТО<sub>СВ</sub>* – это правила, предписывающие целенаправленные действия над множеством определённых объектов (над множеством телеметрируемых объектов, задач ИТО, ПТС, и т.д.) для усовершенствования (для применения по целевому назначению; далее – для применения) системы ИТО.

Стратегия операции усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub> может быть описана в ТЗ на выполнение НИР/ОКР.

*Защита телеметрической информации* – это комплекс организационных и технических мероприятий по предотвращению утечки защищаемой информации, несанкционированных и непреднамеренных воздействий на защищаемую информацию.

#### 4. Адресаты Концепции

Концепция предназначена для регламентирования деятельности специалистов, решающих следующие задачи:

- разработка ПТС и информационных технологий (далее – ИТ);
- изготовление ПТС и ИТ;
- применение ПТС и ИТ по целевому назначению;
- использование ТМИ по целевому назначению (решение задач анализа функционирования бортовых систем и агрегатов РН, РБ и т.д.; далее – задачи анализа);
- разработка нормативов и стандартов.

#### 5. Задачи, решаемые в процессе развития СИТО<sub>СВ</sub>

В процессе развития СИТО<sub>СВ</sub> решают следующие задачи:

- планирование и выполнение НИОКР с учётом требований Концепции и соответствующей ей системы стандартов телеметрии;
- развитие системы стандартов телеметрии в соответствии с требованиями Концепции;
- коррекция положений Концепции по результатам выполнения НИОКР и анализа системы стандартов телеметрии.

#### 6. Планирование и выполнение НИОКР

Актуальны следующие действия при планировании и выполнении вышеупомянутых НИОКР:

- комплексирование НИОКР (т.е. группирование отдельных НИР/ОКР для осуществления в дальнейшем последовательности операций усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub>, объединённых единым замыслом (единой целью);
- совершенствование научно-методического аппарата для

развития Концепции и соответствующей ей системы стандартов телеметрии.

Планирование НИОКР должно осуществляться с использованием результатов анализа предложений, поступивших от предприятий/организаций РКО, а также от заинтересованных предприятий/организаций вне РКО, причём осуществляться предприятиями/организациями, имеющими соответствующие полномочия от Госкорпорации «Роскосмос».

#### 7. Задачи, решаемые СИТО<sub>СВ</sub>

Задачи, решаемые СИТО<sub>СВ</sub> [1, 3], или операции, выполняемые СИТО<sub>СВ</sub>, таковы:

- формирование ТМИ в БРТС;
- приёмо-регистрация ТМИ;
- сбор ТМИ в интересах формирования обобщённого массива данных телеизмерений;
- формирование обобщённого массива данных телеизмерений (далее – ФОМДТ), в том числе с учётом защиты телеметрической информации.

Если выделенные задачи ИТО отнести к СИТО<sub>СВ</sub>, то вход этой системы – *первичные сигналы* [4] (т.е. сигналы с выходов датчиков), а её выход – обобщённые данные телеизмерений. Обобщённые данные – это данные, полученные методами разнесённого приёма [1, 3].

С вышеупомянутыми задачами (операциями) связаны наибольшие потери телеметрической информации.

#### 8. Особенности оценивания стратегий усовершенствования (применения) СИТО<sub>СВ</sub>

*8.1. Состав общих (обобщённых) показателей, характеризующих эффективность стратегии операции усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub>*

Выделены следующие три группы параметров, характеризующих эффективность стратегии операции усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub> [1, 7]:

- 1) материальные затраты на усовершенствование СИТО<sub>СВ</sub>;
- 2) оперативность процесса усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub>;
- 3) полезный эффект от усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub>.

– улучшение качества данных результатов обработки ТМИ, представленных для анализа функционирования телеметрируемых объектов [4], характеризующее прежде всего сокращением потерь информации или получением дополнительной информации;

– уменьшение материальных затрат применением усовершенствованной СИТО<sub>СВ</sub>;

– повышение оперативности решения задач ИТО применением усовершенствованной СИТО<sub>СВ</sub>.

При этом потери ТМИ (дополнительную ТМИ) нужно оценивать с точки зрения возможностей получения новых сведений (знаний) о телеметрируемых объектах [4], т.е. с точки зрения улучшения качества решения задач анализа функционирования (анализа состояний) этих объектов.

#### 8.2. Характеристики потерь ТМИ

Определён состав характеристик потерь ТМИ вследствие влияния неопределённых факторов разной природы и описаны их сущности (см. табл. 1.5 и пояснения к ней [1]).

Установлены следующие причины потерь ТМИ, а также связанные с ними неопределённые факторы [1]:

- неопределённое поведение ТМП, приводящее к ошибкам в выборе ожидаемого диапазона измерений ТМП, к ошибкам в выборе частоты опроса датчика;
- помехи в радиоканалах «борт-Земля», искажающие передаваемые по ним сигналы/данные, содержащие ТМИ;
- аномальное функционирование ПТС СИТО<sub>СВ</sub> (ПТС ТК и ПТС, размещённых на *телеметрируемом объекте* [4]), приводящее к метрологическим отказам;
- недостаточность ТМИ по организационно-техническим причинам (вследствие отказов ПТС ТК, вследствие выхода *телеметрируемого объекта* [4] за установленные зоны радиовидимости ПТС КСИСО ТМИ).

Рассмотренные выше характеристики потерь ТМИ являются по сути частными показателями. Необходимо установить их связь с общими (обобщёнными) показателями, характеризующими эффективность стратегии операции усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub> [1, 7]. Для описания этой связи необходимы соответствующие методики. В частности, разработан [1] научно-методический аппарат (критерии, модели, методики) для оценивания улучшения достоверности данных телеизмерений при замене одного метода получения обобщённых данных на другой.

Примечание: целесообразно характеристики потерь телеметрической информации и связанные с ними неопределённые факторы более детально представить в отдельном Приложении официальной Концепции.

### 8.3. Подходы к оцениванию альтернативных стратегий усовершенствования (применения) СИТО<sub>СВ</sub>

Предложенные [1, 7] общие (обобщённые) показатели связаны с качеством ТМИ и с затрачиваемыми ресурсами и зависят от свойств (характеристик) сигналов/данных отдельных ПТС СИТО<sub>СВ</sub>, для обеспечения которых затрачивают определённые ресурсы. Поэтому ценность той или иной характеристики ТМИ отдельного ПТС определяется её влиянием на общие показатели ИТО [1]. Причём одинаковые общие показатели ИТО могут быть получены осуществлением разных стратегий. Отсюда – актуальность комплексного подхода к построению стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>СВ</sub>, обеспечивающих требуемые показатели эффективности ИТО [1].

## 9. Построение и развитие системы стандартов телеметрии, относящейся к СИТО<sub>СВ</sub>

### 9.1. Цели и задачи стандартизации отечественной телеметрии

Сформулированы [8] следующие цели стандартизации отечественной телеметрии, относящейся к СИТО<sub>СВ</sub>:

- обеспечение технической возможности взаимной поддержки при решении задач построения и развития СИТО<sub>СВ</sub> предприятиями/организациями РКО, а также заинтересованными предприятиями/организациями вне РКО;
- создание механизма отбора наиболее результативных технических решений для практического применения и формулирования соответствующих положений стандартов;
- научно-методическое обеспечение процесса стандартизации совместными усилиями предприятий ракетно-космической отрасли, других заинтересованных лиц, предприятий и организаций.

Основная цель стандартизации – повышение эффективности процесса развития СИТО<sub>СВ</sub> [8].

Для осуществления полноценной стандартизации необходимо решить следующие задачи [8]:

- сформулировать положения стандартов, выполнение которых обеспечивало бы повышение эффективности процесса развития СИТО<sub>СВ</sub>;
- обеспечить практическое выполнение требований сформулированных положений стандартов;
- определить порядок дальнейшего развития стандартов и выполнить соответствующие организационные мероприятия по его практическому осуществлению.

Для их решения нужен комплекс соответствующих организационно-технических мер.

### 9.2. Опыт CCSDS, касающийся первоочередных задач создания системы отечественных стандартов телеметрии

При построении отечественной системы стандартов телеметрии, относящейся к СИТО<sub>СВ</sub>, актуален опыт CCSDS, в частности, опыт трансформирования Оранжевых Книг CCSDS в Синие или Пурпурные Книги.

В Оранжевых Книгах CCSDS (см., например, [9, 10]) представлены экспериментальные результаты [11]. Экспериментальная работа CCSDS основана на «предполагаемых» требованиях. В процессе её выполнения возможно изучение перспективы или демонстрация технической исполнимости в ожидании «жесткого» требования, которое еще не появилось. Аналогичная работа в отечественной практике должна выполняться в ходе НИОКР. Обычно Оранжевые Книги трансформируют в Синие или Пурпурные Книги (рекомендации и лучшие практики CCSDS, соответственно), в качестве примера см. LDPC-кодирование [10, 12]. По правилам, до публикации Синей Книги CCSDS должен существовать, по крайней мере, один аппаратный или программный прототип (или другое исполнение), который демонстрирует и осуществляет все опции и особенности спецификации в оперативно уместной среде (или реальной, или моделируемой). Другими словами, до формулирования тех или иных положений отечественных стандартов телеметрии необходима более чем однократная реализация соответствующих технических решений, причём независимыми исполнителями, например, несколькими предприятиями РКО в ходе выполнения ими ОКР.

Чтобы при формулировании положений отечественных стандартов обеспечить возможность рассмотрения апробированных элементов СИТО<sub>СВ</sub>, целесообразно прежде всего использовать элементы, связанные с широко применяемыми отечественными БРТС типа «Орбита» [13] и БРС-4 [14]. Решение такой первоочередной задачи позволит добиться следующего:

- получить необходимый опыт разработки отечественных стандартов телеметрии;
- прекратить внедрение первичных преобразователей, БРТС и ПТС ТК нестандартных разработок, значительно ухудшающее эффективность процесса развития СИТО<sub>СВ</sub> (особенно в условиях подготовки к решению новых задач ИТО).

Задача создания системы отечественных стандартов телеметрии, относящейся к СИТО<sub>СВ</sub>, связана с апробирован-

ными техническими решениями, реализованными в отечественных РТС.

### 9.3. Основные объекты усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub>

Основными объектами усовершенствования являются сигналы/данные СИТО<sub>СВ</sub>, и, соответственно, методы действий над ними.

Отмечено [1, 3], что аналогичные объекты используют в практике построения стандартов (рекомендаций) CCSDS Направления (Area) SLS (CCSDS – Consultative Committee for Space Data Systems – Консультативный Комитет по космическим системам передачи данных, SLS – Space Link Services – Средства космических радиотелекоммуникаций). Суть вышеупомянутых рекомендаций CCSDS заключается в описании *что надо сделать* (т.е. показаны формы и параметры сигналов, структуры и характеристики данных и т.д.) и в отсутствии жёсткой регламентации *как это надо сделать*, касающейся схемных решений. Чаще всего схемные решения представлены в упрощённом виде, подобно описываемым в материалах изобретения устройствам, где объектом изобретения является лишь способ (устройства здесь для того, чтобы доказать реализуемость способа). Преимущества такого подхода заключаются в предоставлении больших возможностей проявления творческой инициативы разработчиками и конструкторами РТС, а в случае необходимости построения унифицированных РТС следует рассматривать связанные с унификацией требования как дополнительные ограничения (требования).

При построении стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>СВ</sub>, кроме сигналов/данных, содержащих ТМИ, и методов действий над ними (см. п. 9.6 и 9.7), нужно учитывать (устанавливать) режимы информационного обслуживания *телеметрируемого объекта* [15, с. 461-525; 4], а именно: а) регулярный, б) программируемый, в) адаптивный.

### 9.4. Системный подход к построению стандартов телеметрии

Оперирование сигналами/данными, содержащими ТМИ, и методами действий над ними при осуществлении стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>СВ</sub> предполагает системный подход к построению вышеупомянутых стандартов телеметрии.

В этой связи целесообразно построение системы стандартов телеметрии [1, 3] по принципу функциональных стандартов, профилей [16]. Профиль – это совокупность базовых стандартов, ориентированная на выполнение определённой прикладной, коммуникационной функции или на построение системы [16, с. 9]. Функциональный стандарт – это стандарт, охватывающий несколько профилей, как правило, одной группы, и устанавливающий взаимосвязь между ними путём определения их общих и специфических частей [16, с. 16].

Такой подход [17] применяется при построении Рекомендаций CCSDS, касающихся космических радиотелекоммуникаций, и связан, прежде всего, с комплексированием методов действий над данными/сигналами и данных/сигналов с целью осуществления определенных функций, обеспечивающих

значительные преимущества, связанные с повышением помехоустойчивости.

Вышеупомянутое комплексирование при построении отечественной системы стандартов телеметрии связано с задачами ИТО и соответствующими им ПТС СИТО<sub>СВ</sub> (см. п. 7).

### 9.5. Цели действий над сигналами/данными

Цели действий над сигналами/данными программно-техническими средствами СИТО<sub>СВ</sub> с использованием методов, относящихся к СИТО<sub>СВ</sub>, связаны с решением следующей триединой задачи [1]:

- представление сигналов/данных в соответствии с заданной формой (структурой);
- обнаружение и устранение искажений (ошибок);
- создание и устранение избыточности (управление избыточностью данных телеизмерений).

Вышеупомянутые цели действий над сигналами/данными, содержащими ТМИ, учитывают при построении стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>СВ</sub>, обеспечивающих существенное улучшение показателей эффективности ИТО [1] (см. п. 8.1).

### 9.6. Объекты усовершенствования СИТО<sub>СВ</sub> (конкретизированный состав сигналов/данных)

Определён [1, 3] следующий состав сигналов/данных, содержащих ТМИ, актуальных с точки зрения Концепции и соответствующей ей системы стандартов телеметрии:

- $Q_{ТМИ\_ПП}$  – *первичные сигналы* [4] (сигналы на выходе датчиков);
- $Q_{ТМИ\_КП\_1}$  – данные кодов параметров, полученные преобразованием первичных сигналов (в частности, квантованием первичных сигналов по уровню);
- $Q_{ТМИ\_КП\_2}$  – данные  $Q_{ТМИ\_КП\_1}$ , сжатые обратимыми методами;
- $Q_{ТМИ\_КП\_3}$  – интегральные характеристики, полученные преобразованием данных  $Q_{ТМИ\_КП\_1}$  (данные, сжатые необратимыми методами);
- $Q_{ТМИ\_КП\_4}$  – данные  $Q_{ТМИ\_КП\_3}$ , сжатые обратимыми методами;
- $Q_{ТМИ\_КП\_5}$  – данные, выбранные из  $Q_{ТМИ\_КП\_1}$ ,  $Q_{ТМИ\_КП\_2}$ ,  $Q_{ТМИ\_КП\_3}$  и  $Q_{ТМИ\_КП\_4}$  путём исключения избыточных (с точки зрения анализа) данных;
- $Q_{ТМИ\_ТС}$  – телеметрические слова для размещения в них данных  $Q_{ТМИ\_КП}$ ;
- $Q_{ТМИ\_БД}$  – блоки данных для размещения в них телеметрических слов  $Q_{ТМИ\_ТС}$ ;
- $Q_{ТМИ\_ГС\_прд}$  – *групповой сигнал* [4], формируемый на передающей стороне;
- $Q_{ТМИ\_гр\_прд\_обр}$  – *групповой сигнал* [4] обработанный (свёрточное кодирование, фильтрация и т.д.) – т.е. предварительная обработка модулирующего сигнала;
- $Q_{ТМИ\_мод}$  – сигналы на выходе модулятора (методы модуляции, подавленная несущая или остаточная несущая и т.д.);
- $Q_f$  – сигналы несущих и поднесущих частот;
- $Q_{ТМИ\_мод\_обр}$  – обработанные сигналы  $Q_{ТМИ\_мод}$  (подавление одной из боковых полос, устранение внеполосных излучений и т.д.);

–  $Q_{\text{ТМИ\_рег}}$  – ТМИ на выходе наземной ПРС (структура регистрируемой ТМИ);

–  $Q_{\text{ТМИ\_ом}}$  – ТМИ обобщённого массива данных телеизмерений (ТМИ на выходе ПТС ФОМДТ); желательнее, чтобы структуры  $Q_{\text{ТМИ\_рег}}$  и  $Q_{\text{ТМИ\_ом}}$  были одинаковыми.

**9.7. Объекты усовершенствования СИТО<sub>св</sub> (конкретизированный состав методов непосредственных действий над ТМИ)**

Определён [1] следующий состав методов непосредственных действий над сигналами/данными, содержащими ТМИ, осуществляемых ПТС СИТО<sub>св</sub>:

– методы преобразования (обработки) ТМИ (например, методы модуляции, фильтрации, помехоустойчивого кодирования, сжатия данных, криптографического преобразования и т.д.);

– методы накопления (регистрации) ТМИ (касаются прежде всего накопления и последующего воспроизведения ТМИ в бортовых запоминающих устройствах);

– методы обмена данными при передаче ТМИ по каналам связи (касаются прежде всего обмена данными в каналах «борт-Земля», в частности, при осуществлении технологии управляемого разнесённого приёма ТМИ [18], а также обмена данными при сборе ТМИ в интересах ФОМДТ).

Значительное влияние на общие (обобщённые) показатели СИТО<sub>св</sub> оказывают методы измерений физических величин для последующего формирования ТМИ (для формирования *первичных сигналов* [4]).

**9.8. О принципе диверсификации в стандартизации отечественной телеметрии, относящейся к СИТО<sub>св</sub>**

Замечено [1], что задачи ИТО и способы их решения весьма уникальны, поэтому целесообразно СИТО<sub>св</sub> наделять соответствующими специфическими свойствами. В то же время, в современной практике решения задач ИТО широко применяются универсальные ПТС и ИТ (в частности, ПЭВМ, общее ПО, стандартные протоколы обмена данными). Преимущества уникальных СИТО<sub>св</sub> заключаются в более полном учёте сущностей решения задач ИТО, а их обычный недостаток – высокая стоимость из-за производства малыми партиями или штучного производства. Отсюда – одна из задач стандартизации отечественной телеметрии – распространение положений стандартов на другие области, по принципу «от уникального – к универсальному» (диверсификация) [1].

**9.9. Ожидаемые выгоды от стандартизации, касающейся СИТО<sub>св</sub>**

Ожидаемые выгоды от стандартизации, касающейся СИТО<sub>св</sub>, заключаются в следующем [2]:

– существенно сокращаются трудозатраты на разработку технического задания; вместо многостраничного документа указывается ссылка на выбранный стандарт («гораздо проще предоставить требования изготовителю в том, чтобы сеть отвечала стандарту X.25, нежели создавать документ спецификаций объёмом порядка 180 страниц» [19, с. 229]);

– сокращаются затраты на отработку технологии защиты ТМИ перспективных ПТС;

– рациональность рекомендуемых стандартами технических решений подтверждается результатами их практической отработки;

– создаются благоприятные условия взаимодополняемости и здоровой конкуренции между предприятиями-производителями ПТС СИТО<sub>св</sub>;

– создаются благоприятные условия взаимодействия между пользователями ТМИ при решении совместных задач ИТО;

– значительно сокращаются издержки из-за несогласованности применяемых разными пользователями ПТС, информационных технологий, ПО, имеющих специфические особенности;

– расширяются возможности использования зарубежного опыта, технологий и ПТС;

– в процессе текущей работы по усовершенствованию стандартов совершенствуется также механизм (комплекс организационных мер) отбора наиболее подходящих технических решений, основанных на результатах научных исследований; весьма успешно претворяется в жизнь принцип «наука – практике».

К получению перечисленных выше выгод следует стремиться при решении задач стандартизации, касающейся СИТО<sub>св</sub>.

#### **10. Направления развития (усовершенствования) СИТО<sub>св</sub>**

Определены [3] следующие направления развития (усовершенствования) СИТО<sub>св</sub>:

1) совершенствование научно-методического обеспечения процесса развития СИТО<sub>св</sub>, ориентированного на построение относительно компактного телеметрического комплекса космодрома, инвариантного к изменяющимся задачам ИТО; вышеупомянутое совершенствование нужно осуществлять по следующим направлениям:

– развитие настоящей Концепции;

– развитие системы стандартов телеметрии, отражающей требования Концепции;

– построение и последующая коррекция административных положений по поддержанию и развитию Концепции и стандартов телеметрии (аналогичные соответствующим Жёлтым Книгам CCSDS);

2) наиболее важные аспекты стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>св</sub> связаны со структурами ТМИ (со структурами сигналов/данных СИТО<sub>св</sub>) и методами действий над ТМИ, обеспечивающими следующее:

а) *существенное* уменьшение потерь информации или получение дополнительной информации в условиях жёстких ограничений материальных ресурсов и времени на решение задач ИТО (т.е. обеспечивающими улучшение общих (обобщённых) показателей СИТО<sub>св</sub>);

б) инвариантность ТК к текущим (изменяющимся) задачам ИТО, обеспечиваемая следующим:

– управлением избыточностью данных телеизмерений, реализующим возможности существенного замедления роста суммарной скорости передачи данных телеизмерений по каналам «борт-Земля» и сокращения количества каналов разнесения при увеличении количества телеметрируемых параметров;

– применением унифицированных структур ТМИ и методов действий над ТМИ;

3) *существенное* уменьшение потерь информации или получение дополнительной информации обеспечиваются работой по следующим направлениям:

а) разработка и внедрение новых методов измерений физических величин, обеспечивающих получение дополнительной информации о *телеметрируемом объекте* [4]; последующее формирование *первичных сигналов* [4], обладающих свойствами, обеспечивающими благоприятные условия повышения помехоустойчивости ТМИ;

Примечание: вышеупомянутые методы измерений не относятся к рассматриваемой СИТО<sub>св</sub>, однако результаты их осуществления оказывают существенное влияние на условия осуществления стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>св</sub>.

б) методы действий над ТМИ, реализуемые на *телеметрируемом объекте* [4], с управлением избыточностью данных телеизмерений, обеспечивающим создание значительной избыточности данных телеизмерений с учётом поправки на влияние неопределённых факторов разной природы и последующее её устранение; вышеупомянутые методы обеспечивают *существенное* уменьшение потерь ТМИ на *телеметрируемом объекте* в условиях жёстких ограничений пропускной способности каналов «борт-Земля», в частности, представлены [1] способы преобразования *первичного сигнала*, уменьшающие потери ТМИ, заключающиеся в следующем:

– первоначальное избыточное квантование *первичного сигнала* с поправкой на неопределённость размаха исходного *первичного сигнала* с последующим устранением избыточности и передачей информации об уровнях квантования, обеспечивающее уменьшение потерь ТМИ из-за ошибок в выборе ожидаемого диапазона измерений и компактное представление ТМИ [1];

– первоначальное повышение частоты опроса датчика с поправкой на неопределённое поведение ТМП при возникновении полётной аварии на *телеметрируемом объекте*, создающее значительную избыточность данных телеизмерений, с последующим устранением избыточности и передачей компактно представленной ТМИ, в которой отсутствуют потери информации о вышеупомянутой полётной аварии [1];

в) методы повышения помехоустойчивости при передаче ТМИ по отдельному каналу «борт-Земля» (см. разд. 3.1.2 [1]);

г) совершенствование технологий разнесённого приёма ТМИ с целью сокращения потерь информации из-за действия помех в каналах «борт-Земля», заключающееся в следующем:

– внедрение разработанных [1, 9] алгоритмов получения обобщённых данных;

– реализация технологий управляемого разнесённого приёма ТМИ [1, 18];

Примечание: через технологии управляемого разнесённого приёма ТМИ [1, 18] осуществляют управление избыточностью данных телеизмерений, создающее пред-

посылки сокращения количества каналов разнесения (см. ниже);

4) инвариантность СИТО<sub>св</sub> к изменяющимся задачам ИТО и компактный ТК обеспечиваются работой по следующим направлениям:

а) управление избыточностью данных телеизмерений, обеспечивающее существенное замедление роста суммарной скорости передачи данных телеизмерений по каналам «борт-Земля» при увеличении количества телеметрируемых параметров компактным представлением ТМИ в месте её зарождения – на *телеметрируемом объекте* [4]; актуальны [1] следующие два направления:

– сокращение количества ТМП при допустимых потерях ТМИ; методы уменьшения количества ТМП условно разделены [1] на две следующие группы:

- методы (методики) определения рационального состава ТМП [20]; при этом наиболее перспективные направления связаны с увеличением доли наземных испытаний по отношению к лётным испытаниям, с более полным учётом их результатов [21]; с повышением результативности моделирования состояний телеметрируемых объектов, изменяющихся в зависимости от циклограммы полёта;
- методы (методики), ориентированные на их применение на телеметрируемом объекте в полётное время, что позволяет, в частности, результативно использовать освободившиеся телеметрические каналы ступени РН после её отделения [22].

Примечание: вышеупомянутые методы уменьшения количества ТМП [1] не относятся к рассматриваемой СИТО<sub>св</sub>, однако результаты их осуществления оказывают существенное влияние на условия осуществления стратегий усовершенствования и применения СИТО<sub>св</sub>.

– устранение избыточности ТМИ в *бортовой информационно-телеметрической системе* (далее – БИТС) [4]; (см. состав данных телеизмерений, формируемых в БИТС, в п. 9.6);

б) управление избыточностью данных телеизмерений, обеспечивающее сокращение количества каналов разнесения; реализация технологий управляемого разнесённого приёма ТМИ [1, 18], создающая предпосылки сокращения количества каналов разнесения;

в) унификация структур ТМИ, причём относительно многочисленные структуры ТМИ должны быть построены по единым правилам, что делает их инвариантными по отношению к ПТС и технологиям, применяемым для действий над ТМИ [2];

Примечания:

1. Признаки инвариантности СИТО<sub>св</sub> (ТК) к изменяющимся задачам ИТО проявляются в задействовании по каждому пуску относительно немногочисленных ПТС ТК и в полном составе, в обеспечении при этом допустимых потерь ТМИ.

2. Для обеспечения инвариантности СИТО<sub>св</sub> (ТК) необходимо исключить доработки ПО ТК с целью адаптации *программы телеметрических измерений* (ПТИ) [4] к существующим ПТС ТК при подготовке ТК к пуску, с целью

согласования структур ТМИ, формируемой в БРТС, с применяемым ПО ТК.

5) создание рабочей группы «СИТО<sub>СВ</sub>» [3] и обеспечение условий для её результативной работы; требования, относящиеся к рабочей группе «СИТО<sub>СВ</sub>»:

– рабочая группа «СИТО<sub>СВ</sub>» предназначена для управления (менеджмента) процессом развития концепции развития СИТО<sub>СВ</sub> и соответствующей ей системы стандартов телеметрии, а также для контроля за практическим выполнением представленных в них требований;

– рабочую группу «СИТО<sub>СВ</sub>» формируют из квалифицированных разносторонних специалистов-экспертов предприятий ракетно-космической отрасли;

– порядок формирования рабочей группы «СИТО<sub>СВ</sub>», регламент её работы и порядок её финансирования определены в вышеупомянутых административных положениях (типа Устава рабочей группы «СИТО<sub>СВ</sub>»).

### Заключение

Таким образом, предложенная Концепция развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения позволяет существенно улучшить управление развитием отечественных систем, создать механизм регламентирования вышеупомянутого развития, чтобы результативно использовать созидательные возможности предприятий предприятий/организаций ракетно-космической отрасли, а также заинтересованных предприятий/организаций вне ракетно-космической отрасли. Соответственно, будут созданы благоприятные условия для перманентного улучшения технико-экономических характеристик телеметрических программно-технических средств и информационных технологий, относящихся к этим системам.

### Литература:

1. Воронцов В.Л. Система информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения. Стратегии усовершенствования и применения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 236с.
2. Артемьев В.Ю., Воронцов В.Л. О подходах к разработке отечественного стандарта по телеметрии в ракетно-космической и ракетной технике // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 1. – С. 32-38.
3. Воронцов В.Л., Давыдов И.А. Регламентирование процесса развития систем информационно-телеметрического обеспечения отработки средств выведения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2021. Т. 8. Вып. 2. – С. 43-50.
4. ГОСТ 19619-74. Оборудование радиотелеметрическое. Термины и определения. – М.: Изд-во официальное, 1988.-26с.
5. Надёжность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (предс.) и др. – М.: Машиностроение. Т.1: Методология. Организация. Терминология. / Под ред. А.И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с.
6. ОСТ 134-1020-2008. Нормативный документ по стандартизации РКТ. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Федеральное космическое агентство, 2008.-56с.
7. Воронцов В.Л., Давыдов И.А., Медведев Е.В. Подходы к регламентированию процесса развития средств информационно-телеметрического обеспечения отработки объектов ракетно-космической техники // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9. Вып. 1. – С. 42-54.
8. Артемьев В.Ю., Воронцов В.Л. О стандартизации, эффективности, целях и стимулах, касающихся развития отечественной телеметрии, относящейся к ракетно-космической и ракетной технике // Электронный журнал «Труды МАИ». 2011. № 44. – С. 1-15.
9. Correlated Data Generation, Research and Development for Space Data System Standards CCSDS 551.1-0-2, Issue 2, Orange Book, Consultative Committee for Space Data Systems, August 2020.
10. Low Density Parity Check codes for Use in Near-Earth and Deep Space Applications, Research and Development for Space Data System Standards CCSDS 131.1-0-1, Issue 1, Orange Book, Consultative Committee for Space Data Systems, August 2006.
11. Restructured Organization and Processes for the Consultative Committee for Space Data Systems CCSDS A02.1-Y-2, Issue 2, Yellow Book, Consultative Committee for Space Data Systems, April 2004.
12. TM Synchronization and Channel Coding, Recommended Standard CCSDS 131.0-B-2, Issue 2, Blue Book, Consultative Committee for Space Data Systems, August 2011.
13. Аппаратура бортовая «Орбита-IVMO». Руководство по эксплуатации ЯГАИ.460800. 001 РЭ, Ч. 1 и Ч. 2, 2001г.
14. Победоносцев В.А. Очерки истории развития отечественной ракетной радиотелеметрии (1946-2006гг.) и место системы БРС-4 в этой истории. – М.: Тривант, 2007. – 160с.
15. Мановцев А.П. Основы теории радиотелеметрии. – М.: Энергия, 1973. – 592с.
16. Щербо В.К. Стандарты вычислительных сетей. Взаимосвязи сетей. Справочник. – М.: КУДИЦ – ОБРАЗ, 2000. – 272с.
17. Воронцов В.Л. Анализ возможностей использования рекомендаций CCSDS с целью улучшения технических характеристик отечественных космических радиолиний, предназначенных для передачи телеметрической информации с объектов различного назначения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3. Вып. 2. – С. 66-72.
18. Воронцов В.Л. Методы управляемого разнесённого приёма данных телеизмерений // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6. Вып. 4. – С. 66-74.

19. Блэк Ю. Сети ЭВМ: Протоколы, стандарты, интерфейсы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 506с.
20. Козырев Г.И. Методы идентификации средств телеизмерений в условиях воздействия неопределённых дестабилизирующих факторов. – СПб.: ВИККА имени А.Ф. Можайского, 1996. – 90с.
21. Основы испытаний летательных аппаратов: Учебник для вузов / Кринецкий Е.И., Александровская Л.Н., Мельников В.С., Максимов Н.А.; Под общ. ред. Кринецкого Е.И. – М.: Машиностроение, 1989.-312с.
22. Капинос Е.Ф., Грек О.И., Гумённый Ю.В., Гужевников Н.Н. Устройство для передачи и приёма телеметрической информации. А.с. № 1681319, БИ № 36 от 30.09.1991.

УДК 004.896

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПОДХОДОВ К ПРИМЕНЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ  
ЛЕВИТАЦИОННОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ  
ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**RESULTS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT OF APPROACHES TO THE APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC  
LEVITATION GUIDE FOR USE IN COMPUTER SYSTEMS  
FOR VISUAL ASSESSMENT OF THE QUALITY OF MICROELECTRONICS PRODUCTS**

**Рубцов Ю.В.**, АО «ЦКБ «Дейтон»; +7-926-009-37-00, rubtsov@deyton.ru

**Rubtsov U.V.**, JSC “Central Design Office “Deyton”; +7-926-009-37-00, rubtsov@deyton.ru

**Аннотация.** Современные требования к разработке изделий микроэлектроники выдвигают необходимость автоматизации технологических процессов визуальной оценки их качества. В настоящее время проверка качества изделий микроэлектроники выполняется без применения средств автоматизации и характеризуется низкой производительностью и ограничена человеческим фактором. Следовательно, необходимо проводить исследования, разрабатывать и применять новые технологии для преодоления существующих ограничений. В этой статье представлен подход к разработке новой электромагнитной левитационной направляющей для использования в компьютерных системах визуальной оценки качества изделий микроэлектроники, в которых конструкции и расположение компонентов магнитной направляющей рассмотрены с учетом требований и принципов проектирования технологических процессов производства изделий микроэлектроники.

Исследования проводились с использованием детерминированных методов, основанных на точных моделях, описывающих пространственную автокорреляцию изделий, в процессах оценки их качества, использующихся на протяжении всех этапов разработки и изготовления изделий для обеспечения точности определения дефектов на их поверхности. В результате введено понятие точной электромагнитной линейной направляющей. Результаты исследований распространяются на изделия микроэлектроники, имеющие в своем составе металл, который обладает магнитными свойствами и внешние электромагнитные воздействия не оказывают последующие влияния на свойства изделий.

**Annotation.** Modern requirements for the development of microelectronics products make it necessary to automate technological processes for visual assessment of their quality. Currently, quality control of microelectronics products is performed without the use of automation tools and is characterized by low productivity and limited by the human factor. Therefore, it is necessary to conduct research, develop and apply new technologies to overcome existing limitations. This article presents an approach to the development of a new electromagnetic levitation guide for use in computer systems for visual assessment of the quality of microelectronics products, in which the design and location of the components of the magnetic guide are considered taking into account the requirements and principles of designing technological processes for the production of microelectronics products.

The studies were carried out using deterministic methods based on accurate models describing the spatial autocorrelation of products in the processes of assessing their quality, used throughout all stages of product development and manufacture to ensure the accuracy of determining defects on their surface. As a result, the concept of an accurate electromagnetic linear guide is introduced. The research results apply to microelectronics products that contain a metal that has magnetic properties and external electromagnetic influences do not have a subsequent effect on the properties of the products.

**Ключевые слова:** магнитная направляющая; электромагнитная левитация, автоматизация процессов обеспечения качества изделий микроэлектроники.

**Keywords:** magnetic guide; electromagnetic levitation, automation of processes, quality assurance of microelectronics products.

## Введение

В результативности процессов визуальной оценки качества изделий микроэлектроники существенную роль играет точность определения дефектов и манипулирования ими. Технологии компьютерного зрения, машинного обучения, обработки информации в нейронных сетях позволяют автоматизировать эти процессы, тем самым повысить объективность результатов.

При проведении настоящих исследований определена технология и разработаны подходы к применению электромагнитной левитационной направляющей для использования в компьютерных системах визуальной оценки качества изделий микроэлектроники, которые апробированы в технологических процессах на производстве.

При этом выполнены задачи, обеспечившие достижение цели:

- исследованы подходы к построению процессов, обеспечивающих точное позиционирование изделий для гарантированного определения дефектов на их поверхностях;

- оценена возможность применения активных магнитных направляющих в системах обеспечения качества изделий микроэлектроники;

- выполнено проектирование направляющих электромагнитной левитации, разработана их конструкция и проведена интеграция функционально значимых компонентов;

- формализованы исходные и определены выходные данные, требования к области применения результатов работ и перспективы.

Исследования по обозначенной теме, в основном, проводятся за рубежом и их результаты не имеют достаточного для применения доступа. Объектами настоящих исследований являются процессы обеспечения качества изделий микроэлектроники, которые на текущий момент имеют существенные недостатки по причине роста объема выпускаемых изделий в условиях их минимизации и интеграции.

## Основная часть

### 1. Исследование подходов к проектированию процессов, обеспечивающих точное позиционирование изделий для гарантированного определения дефектов на их поверхностях

В качестве тестовых изделий использовались корпуса металлостеклянные: 401.14-3; 401.14-4; 401.14-5; 401.14-6.01 для интегральных микросхем. Изображение верхней части одного из них, в руках работника – инспектора качества представлено на рисунке 1.

Подкупаемой простоте конструкции корпуса противостоят: разнообразие материалов, требуемая точностью малых размеров и неплоскостность элементов. В составе изделия имеются элементы, имеющие в своем составе металл, который обладает магнитными свойствами, обеспечивающий реализацию результатов настоящих исследований.

В последние десятилетия исследования и разработки в областях создания изделий микроэлектроники были со-



Рубцов Ю.В.

средоточены на мерах по дальнейшему повышению уровня интеграции элементов и минимизации размеров. Тем не менее, общая производительность систем визуальной оценки качества изделий по-прежнему ограничена низкими скоростями процесса, человеческим фактором, а также трудоемкими ручными манипуляциями изделий перед глазами работника-контролера с помощью микроскопа с кратностью увеличения от единиц для относительно больших изделий до нескольких сотен для миниатюрных.

Повышение выхода годных изделий также ограничено устоявшимся мышлением работника-контролера, проверяющего качество, основанное на том, что будет гораздо проще отправить изделие в брак, чем уточнять природу и форму сомнительного дефекта. Ведь оценка и оплата объёма выполненной работы определяется числом входящих изделий.

Автоматизация процессов визуальной оценки качества изделий обеспечивает снижение влияния человеческого фактора и возможна с применением систем компьютерного зрения, машинного обучения, обработки информации в нейронных сетях. При этом, должны быть включены системы автоматизированной подачи, выравнивания изделий и вращения, подобно тому, как это делает работник-контролер вручную перед микроскопом. В этой постановке – повышение производительности автоматизированной подачи и вращения изделий перед камерой системы компьютерного зрения неизбежно приводит к увеличению динамических возмущений, вызванных технологическими силами, приводными моментами и дисбалансом вращающихся деталей [1]. Следовательно, растущее влияние этих возмущающих сил может поставить под угрозу качество и стабильность процессов. Чтобы преодолеть существующую

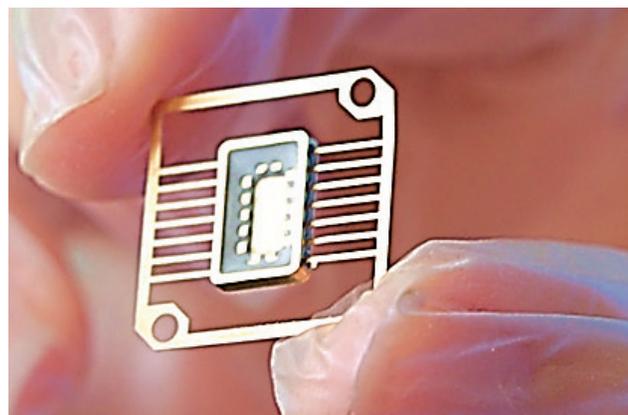


Рис. 1. Изображение корпуса, применяемого в исследованиях

щие ограничения, необходимо проводить исследования и применять новые концепции и технологии. В этом контексте электромагнитные изделия и направляющие обладают значительным потенциалом для повышения производительности процессов оценки качества.

## **2. Оценка возможности применения активных магнитных направляющих в системах оценки качества изделий микроэлектроники**

Система направляющих транспортной ленты в процессах оценки качества изделий микроэлектроники оказывает значительное влияние на его общую производительность. Активные магнитные направляющие обладают значительными преимуществами по сравнению с традиционными системами, такими как фрикционные направляющие, роликовые направляющие, гидростатические или аэростатические направляющие [2]. Обеспечивая работу без трения технология электромагнитной левитации обеспечивает быстрое и точное движение. Отсутствие специальных сред и износа обеспечивает устройство низкими требованиями к обслуживанию. В отличие от устоявшихся концепций, использующих силы отталкивания, принцип работы магнитных направляющих основан на тяговых силах электромагнитов.

Для обеспечения надежной работы требуется активная система управления электромагнитными приводами, которая позволяет адаптивно регулировать свойства направляющей, что приводит к высокому демпфированию и необходимой статической жесткости. Кроме того, направляющая выполняет функции датчика и исполнительного механизма, позволяя определять технологические силы и операции точного позиционирования. Современные прототипы подобных систем демонстрируют возможности применения такой технологии. Экспериментальная оценка направляющих устройства с электромагнитным управлением подтверждает улучшенную устойчивость к вибрации по сравнению с работой других вышеописанных направляющих. Кроме того, можно выполнить оценку силы в процессе и точное позиционирование по необходимому числу степеней свободы.

В процессе исследований были рассмотрены магнито-статические взаимодействия между вращающимися магнитами, устроенными для создания равновесного положения корпуса. Доказано, что этот тип магнитной левитации не полагается на гравитацию как на уравновешивающую силу для достижения положения равновесия [3]. Основываясь на теоретических аргументах и численном моделировании, показано, что постоянного вертикального поля и усиленного демпфирования вихревых токов достаточно для создания левитации и отображения тех же тенденций в отношении скорости вращения и размера корпуса, которые наблюдались в экспериментах.

Точные устройства в силу упомянутых выше особенностей активных магнитных направляющих ориентированы на процесс адаптации жесткости, демпфирования направляющей и создают необходимые условия для повышения производительности оценки качества изделий. Операции точного позиционирования, реализованные в устройствах

со стороны изделий, позволяют компенсировать статические и динамические отклонения, т.е. ошибки в определении дефектов, а также не допустить механических деформаций изделий. Кроме того, разрабатываемые устройства должны позволять обеспечить точное манипулирование изделий перед камерами систем компьютерного зрения.

## **3. Цель исследований**

Несмотря на общие преимущества технологии электромагнитной левитации, существующие магнитные направляющие для использования в системах оценки качества, не обеспечивают точности, необходимой для точного обнаружения и классификации дефектов изделий микроэлектроники. Известные приложения ограничиваются транспортировкой и позиционированием, например, в прецизионной литографии. Активная магнитная направляющая для реального использования в системах оценки качества изделий в публикациях отсутствует. В этой статье представлены результаты исследований подхода к проектированию электромагнитной левитационной направляющей для использования в системах оценки качества изделий, в составе которых имеются элементы, имеющие металл, обладающий магнитными свойствами и обеспечивающий реализацию настоящих исследований.

В результатах настоящих исследований предлагается методика проектирования электромагнитных точных линейных направляющих для использования в системах оценки качества изделий, в которой учитываются выбор и интеграция функционально значимых компонентов и представлена концепция новой точной электромагнитной направляющей на примере фактически разработанной системы компьютерного зрения.

## **4. Проектирование направляющих электромагнитной левитации корпусов для микросхем в системах компьютерного зрения для обнаружения дефектов поверхностей**

Проектирование механической части систем компьютерного зрения регламентируется определенными концепциями и принципами, методами, приемами и средствами, обеспечивающими высокую точность работы разрабатываемых и эксплуатируемых систем. При применении магнитных направляющих в системе необходимо учитывать основные функциональные требования к технологиям электромагнитной левитации. Отличительной особенностью активных магнитных направляющих является обратное направление опорных сил. Таким образом, прямая замена направляющих магнитными элементами невозможна. Внедрение технологии требует перепроектирования системы. Следовательно, требуется целостный подход к разработке магнитной направляющей и ее применения. Процесс разработки можно разделить на несколько рабочих этапов. На всех этапах особое внимание уделяется фундаментальным принципам проектирования систем компьютерного зрения. Детерминированные методы и инструменты применяются на протяжении всего процесса проектирования.

Первоначально определяется область применения и ее конкретные требования. На этой основе выполняются расчеты и определяется конструкция расположения элек-

ромагнитов с последующим выбором конструкционных материалов и основных компонентов. Затем рассматривается интеграция соответствующих компонентов. Предыдущие рабочие этапы определяют общий вид магнитной направляющей и устанавливают граничные условия для последовательного проектирования электромагнитных приводов. Наконец, проверка и оптимизация приводят к окончательному проекту.

#### 4.1. Требования к области применения и исходные данные

Предполагается, что инспектируемые корпуса для микросхем будут двигаться на транспортной ленте со скоростью достаточной для осмотра их поверхностей с помощью стационарно расположенных камер компьютерного зрения. Так как камеры могут осматривать только лицевую и боковые стороны корпусов, тыльная сторона лежит на транспортной ленте, ее необходимо с помощью электромагнитных левитационных направляющих развернуть в положение наиболее приемлемое для осмотра и перевернуть обратной стороной перед камерами.

Массогабаритные размеры корпусов 401.14-3; 401.14-4; 401.14-5; 401.14-6.01 берутся из конструкторской документации. Они необходимы для расчета направлений и величин сил электромагнитных левитационных направляющих и представлены на рисунке 2. Масса корпуса составляет: 8 грамм.

Точно так же разрабатываемая система должна соответствовать требованиям к ее производительности – не менее один корпус в секунду.

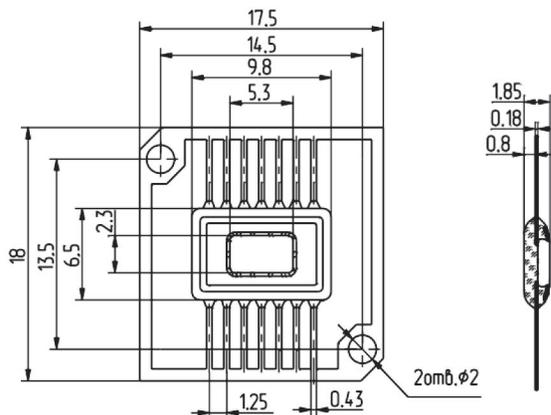


Рис. 2. Габаритные размеры исследуемого корпуса, используемые для расчета направлений и величин сил электромагнитных левитационных направляющих

#### 4.2. Определение конструкции электромагнитной левитационной направляющей и выполнение необходимых расчетов

Левитация в данной системе предполагает подъём и разворот корпуса с помощью магнитного поля над транспортной лентой. Магнитное поле используется для компенсации притяжения корпусов. Оно создается при помощи:

- постоянного магнита – изделие из магнитотвёрдого материала с высокой остаточной магнитной индукцией, сохраняющее состояние намагниченности в течение длительного времени;

- электромагнита – изделие, состоящее из обмотки и ферромагнитного сердечника, который приобретает свойства магнита при прохождении по обмотке электрического тока.

Расположение элементов конструкции электромагнитной левитационной направляющей определяется задачами по оценке качества корпусов. Кроме того, указанная конструкция определяется граничными условиями для интеграции других функционально важных компонентов в системе оценки качества. Критериями разрабатываемой конструкции являются: минимальный запас погрешности, достаточное время срабатывания, согласованность элементов и компактность.

В связи с относительно небольшим диапазоном перемещения в базовой части системы используются магниты. Электромагниты, как активные элементы исполнительной системы, монтируются на раме транспортной ленты. Это уменьшает количество необходимых линий подачи и сопротивление осей перемещения как источника нелинейных сил трения [4]. При этом учитываются переменные магнитные силы, чтобы обеспечить левитацию в любом положении по ходу движения. Что касается компоновки, то рассматриваются дифференциальная и симметричная схемы, представленные на рисунке 3.

Схемы компоновки элементов

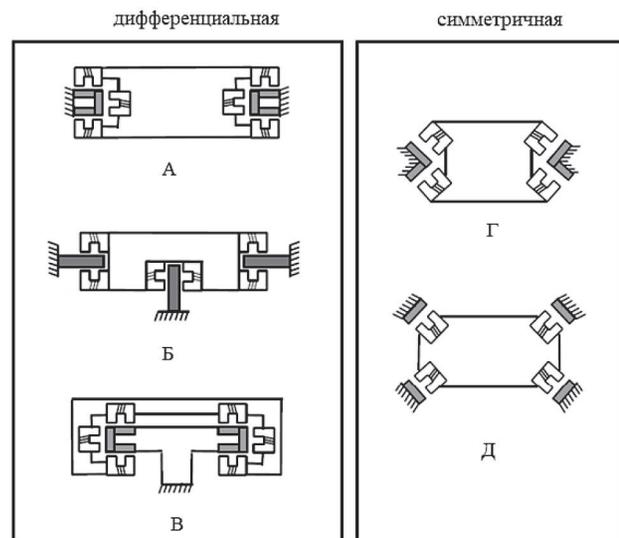


Рис. 3. Дифференциальные и симметричные схемы электромагнитных левитационных направляющих, используемые в проведенных исследованиях

В дифференциальных схемах используются приводы, состоящие из противоположных электромагнитов для приложения двунаправленных сил. Это позволяет осуществлять независимый контроль отдельных степеней свободы. В симметричных схемах меньшее количество необходимых магнитов за счет функциональной независимости. Это достигается за счет наклонного положения отдельных магнитов, что приводит к повышенной сложности из-за связанных степеней свободы.

Несмотря на меньшее количество магнитов, симметричные схемы могут потребовать больше места внутри

конструкции системы. Это связано с соотношением между активной поверхностью магнита и его силой.

Если изобразить магнитное поле силовыми линиями, то каждая из них является составной частью общего магнитного потока, проходящей под углом пересечения плоскости корпуса [5]. Если силовая линия пересекает плоскость корпуса под небольшим углом, то и вклад её в магнитный поток будет небольшим, но ее необходимо также учитывать, так как корпус должен быть повернутым. В общем случае магнитный поток определяется при помощи скалярного произведения векторов. Если  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции,  $\vec{A}$  – вектор перпендикулярный плоскости корпуса, тогда:  $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}$ . Таким образом:  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta$ , и магнитный поток для разрабатываемого устройства – это величина, равная произведению индукции магнитного поля, площади плоскости корпуса и косинуса угла между нормалью к плоскости и направлением линий индукции.

Величина магнитного потока зависит от площади корпуса. Можно определить необходимую площадь и ориентировать её в пространстве относительно магнитного поля. В случае, если плоскость корпуса перпендикулярна полю, угол равен нулю, то магнитный поток будет равняться  $B \cdot A$ .

Из приведенной формулы магнитного потока выводится определение его единицы для инспектируемого корпуса – вебер (Вб):  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 \cdot \cos\theta$ , то есть магнитный поток 1 Вебер – это магнитный поток, проходящий через плоскость площадью 1 квадратный метр, которая ориентирована перпендикулярно линиям однородного магнитного поля с индукцией 1 Тесла (Тл). При этом, в нашем случае, площадь корпуса равна  $315 \text{ мм}^2$  или  $315 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

С магнитным потоком связана плотность магнитного потока. Она определяется как величина магнитного потока через единицу площади плоскости корпуса, измеряется в Тесла и является основанием для построения соотношений между активной поверхностью магнита и силой магнита, выраженных формулой силы притяжения Максвелла:

$$F = \frac{B^2 A}{2\mu_0}$$

где:  $F$  – описывает силу магнита;  
 $B$  – плотность потока;  
 $A$  – поверхность магнита;  
 $\mu_0$  – магнитную постоянную.

Поскольку меньшее количество магнитов должно площадь возникающие нагрузки, поверхность магнита и его габаритные размеры, соответственно, должны быть увеличены для симметричной схемы. Примерный расчет был выполнен для определения минимальной поверхности магнитов для дифференциальных и симметричных схем. Минимальная поверхность магнита определяется его минимальной силой, которая необходима для обеспечения надежной левитации во всем диапазоне перемещения корпуса. Результаты расчетов, представленные на рисунке 4, показывают значительно более высокую минимальную поверхность магнита для симметричных расположений.

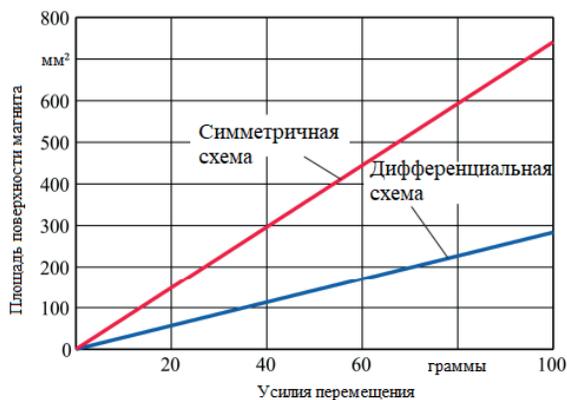


Рис. 4. Графическое представление результатов проведенных исследований в части расчета площади поверхности магнитов для дифференциальных и симметричных схем и усилий перемещения

При этом дифференциальное расположение является подходящим выбором для реализации компактной конструкции и несвязанное приведение в действие отдельных степеней свободы обеспечивает функциональную независимость и упрощает применение устройства.

Сравнение применяемых критериев, предложенных вариантов в таблице 1, показывает, что дифференциальная А-схема наиболее подходит для предполагаемого применения.

Таблица 1

Критерии/Схемы	А	Б	В	Г	Д
Число магнитов	-	-	-	+	+
Размеры магнита	+	+	+	-	-
Моменты срабатывания	+	+	+	+	+
Оценка погрешностей	+	-	+	-	-
Жесткость конструкции	+	-	-	+	+
Функциональная зависимость	+	+	+	-	-

При использовании дифференциальной В-схемы прогнозируется работа направляющей с недостаточной величиной сил левитации. В случае использования Б-схемы уплотненная установка приводов для горизонтального позиционирования снижает жесткость направляющих. Первоначальная А-схема на рисунке 3 адаптирована к конфигурации стационарного магнита и изменена, чтобы обеспечить легкий доступ к области инспектирования корпусов. На рисунке 5 показана полученная схема адаптированной установки.

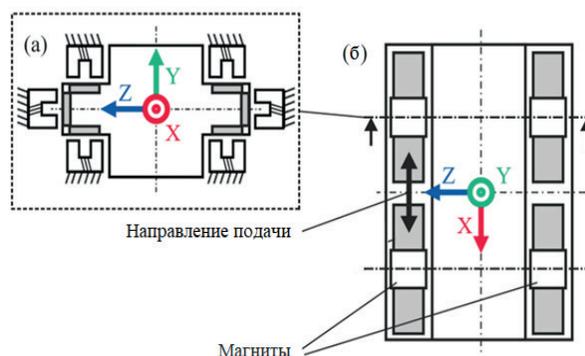


Рис. 5. Схема адаптированной установки

## 5. Выбор материалов

Сталь является распространенным материалом для выбора направляющих. Высокая стабильность и долговеч-

ность делают ее идеальным материалом для механически нагруженных конструкций. При точном функционировании подобных систем технологические усилия обычно не превышают 0,1 Н. Таким образом, механическое напряжение в основном создается системой привода и другими потенциальными исполнительными механизмами. Наряду с механическими характеристиками решающую роль в выборе материала играют тепловые свойства.

Принимая во внимание низкие предполагаемые усилия процесса точного позиционирования корпусов, само собой разумеется, что ошибки позиционирования из-за термического расширения материала являются более значительными. Широкое использование стали и алюминия в таких установках ограничено из-за относительно высоких коэффициентов теплового расширения. Инвар – сплав никеля и железа, обладает идеальными механическими и термическими свойствами. Однако высокая стоимость сырья и затратные условия обработки делают широкое применение инвара нерентабельным. Сталь используется для усиления механически напряженных участков. Алюминий используется для селективного отвода тепла. Инвар используется для компонентов с исключительными требованиями к точности, например – целевые поверхности для измерения положения.

#### 6. Интеграция функционально значимых компонентов

Из-за нестабильного характера магнитных сил электромагнитная направляющая требует непрерывного измерения магнитных воздушных зазоров наряду с активным контролем соответствующих токов. Емкостные датчики используются для контроля воздушного зазора каждого магнита. Для этого стационарная конфигурация магнита и датчика используется для общей точности из-за постоянного расстояния между измерительной системой и центральной точкой корпуса. Кроме того, камеры получают дополнительную информацию о его движении. В первую очередь эта информация используется для увеличения разрешения и полосы пропускания измерения положения. Кроме того, данные могут быть использованы для получения информации о структурной механике системы. Выбор линейных направляющих обусловлен тем, что они обеспечивают высокую точность и динамику движения. Перемещение точки приложения ближе к центру корпуса значительно снижает влияние крутящего момента на накопление ошибок. Кроме того, эта конфигурация обеспечивает равномерный приток тепла и эффективное его рассеивание.

В соответствии с устройством магнита блок катушек неподвижно закреплен на раме направляющей, а на салазках размещена магнитная дорожка. Таким образом, размеры направляющей ограничивают общую длину магнитной дорожки. При этом размер блока катушек пропорционален достигаемому усилию подачи. Учитывая технические характеристики доступных направляющих, требуемое усилие подачи и ход не могут быть реализованы с помощью одного привода для заданной длины магнитной дорожки. Следовательно, выбрана портальная конфигурация из двух линейных направляющих уменьшенного размера. Открытый линейный энкодер – преобразователь угловых перемещений предоставляет данные о положении для управления положением корпуса. Таким

образом, для управления обоими направляющими используется один линейный энкодер. Ошибки параллакса, когда измерения выполняются под разными углами обзора, учитываются при выборе места размещения энкодера. Ошибки измерений возникают из-за вращения корпуса вокруг оси Y и Z. Исходя из определения диапазона точного позиционирования установки, максимальный угол наклона оценивается в 0,05 градуса по обеим осям. В сочетании с портальной системой, размещение энкодера может быть правильным в позиции А, представленной на рисунке 6.

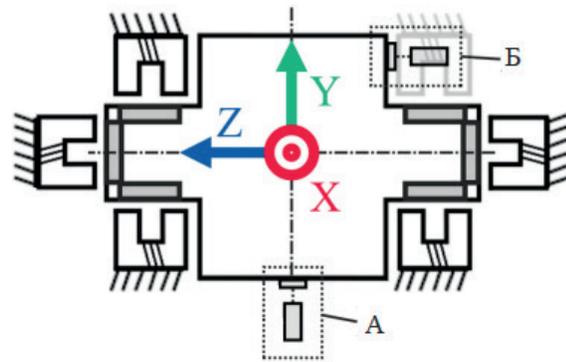


Рис. 6. Схема размещения энкодера (позиция А)

Установка энкодера в положении В (показана на рисунке 6) незначительно уменьшает ошибку позиционирования, однако в этой конфигурации он размещается на силовой раме между электромагнитными приводами, что приводит к увеличению ошибок. Таким образом, выбрана позиция А.

С учетом расположения магнитов и интеграции функционально значимых компонентов, рассмотренных ранее, на рисунке 7 показана схема точной электромагнитной направляющей. Оценка ошибок в ходе разработки показывает снижение предполагаемой общей ошибки в положении корпуса примерно на 51% по сравнению с подобными предлагаемыми конструкциями.

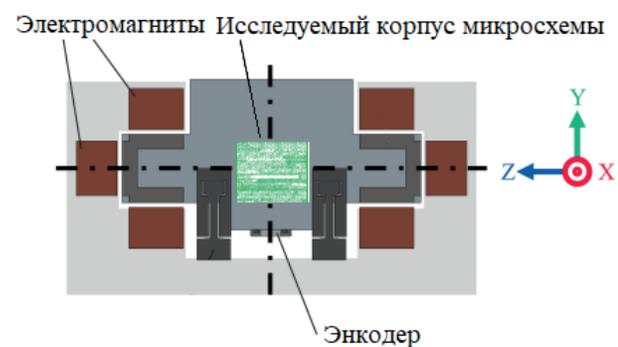


Рис. 7. Схема точной электромагнитной направляющей.

#### Заключение

Несмотря на технические возможности, визуальный контроль поиска дефектов на поверхности корпусов для микросхем в настоящее время выполняется без применения средств автоматизации, характеризуются низкой производительностью, ограничен человеческим фактором. Применение систем компьютерного зрения, машинного об-

учения, обработки информации в нейронных сетях является подходящей стратегией для исправления ситуации. В этом контексте обсуждается потенциал активных магнитных направляющих для использования в точном позиционировании корпусов микросхем перед камерами с многократным увеличением. Описаны преимущества и прототипы реализации технологии электромагнитной левитации. Кроме того, предлагается методология проектирования новой электромагнитной точной линейной направляющей. Она обеспечивает системный подход, позволяющий разбить сложный процесс разработки на несколько рабочих этапов. Кроме того, она реализует детерминированные концепции, объединяя методические процедуры для построения магнитных направляющих и принципы проектирования систем компьютерного зрения в этой части. Детерминированные инструменты позволяют учитывать влияние конкретных конструктивных особенностей на общие свойства конструкции, что позволяет вести целенаправленный и эффективный процесс проектирования по сравнению с подходами, основанными на эмпирических знаниях. Предложенная методология проектирования иллюстрируется созданием концепции новой электромагнитной направляющей. Анализ погрешностей позиционирования подтверждает снижение расчетной погрешности в положении корпуса за счет идеального расположения исполнительных механизмов, датчиков, выбора конкретного материала, а также опти-

мизации топологии направляющих. Работа выполнена для корпусов металлокерамических: 401.14-3; 401.14-4; 401.14-5; 401.14-6.01 и может быть применена для других типов изделий микроэлектроники, имеющих в своем составе металл, который обладает магнитными свойствами и на свойства которых не оказывают последующие влияния внешние электромагнитные воздействия.

#### Литература:

1. Denkena B, Guemmer O, Floeter F. Evaluation of electromagnetic guides in machine tools. Annals of the CIRP, Volume 63, Issue 1, 2014, p. 357-360.
2. Denkena B, Floeter F, Bruehne T. Conceptual design for electromagnetic guided rotary table in machine tools. Procedia CIRP, Volume 24, 2014, p. 80-85.
3. Joachim Marco Hermansen, Frederik Laust Durhuus, Cathrine Frandsen, Marco Beleggia, Christian R. H. Bahl, Rasmus Bjork. Magnetic levitation by rotation, Cornell University, physics arXiv:2305.00812, Apr 2023.
4. Denkena B, Guemmer O, Krueger R. Electromagnetic Levitation Guide for Use in Ultra-Precision Milling Centres. Procedia CIRP 37 (2015) 199 – 204.
5. Mohanad Nawfal Mustafa Mustafa. Comprehensive review and analysis of the electromagnetic levitation systems (modeling, controllers, nonlinearity sources) E3S Web of Conferences 371, 04027 (2023).

УДК 330.42

### ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ APPROACH TO MODELING ECONOMIC PROCESSES

**Бокв С.И.**, д. э. н., член-корреспондент РАН и АВН, главный научный сотрудник ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, заведующий базовой кафедрой «Менеджмент в сфере систем вооружений» ФГБОУ ВО «Российский технологический университет – МИРЭА», заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, тел. 89859289204, bokov.s.i@mail.ru

**Пестун У.А.**, к. э. н., Заведующий лабораторией ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, доцент базовой кафедры «Менеджмент в сфере систем вооружений» ФГБОУ ВО «Российский технологический университет – МИРЭА», тел. 89265487589, ulun2015@yandex.ru

**S.I. Bokov**, Doctor of Economics, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences and AVN, Chief Researcher of the FSBI "46 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Head of the Basic Department "Management in the Field of Weapons Systems" of the Russian Technological University – MIREA, Honored Scientist of the Russian Federation, laureate of the Russian Government Prize in the field of science and technology technicians, tel. 89859289204, bokov.s.i@mail.ru

**U.A. Pestun**, Ph.D. in Economics, Head of the Laboratory of the Federal State Budgetary Institution "46 Central Research Institute" of the Ministry of Defense of Russia, Associate Professor of the Basic Department "Management in the Field of Weapons Systems" of the Federal State Budgetary Educational Institution "Russian Technological University – MIREA", tel. 89265487589, ulun2015@yandex.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы, касающиеся экономического моделирования, посредством сведения связей экономических процессов к уравнениям Лотки-Вольтерра, отражена этапность проведения такого моделирования рассмотрены подходы построения экономических моделей и их анализа.

**Annotation.** The work examines issues related to economic modeling by reducing the connections of economic processes to the Lotka-Walterra equations, reflects the stages of such modeling, and considers approaches to constructing economic models and their analysis.

**Ключевые слова:** экономическое моделирование, прямая и обратная задачи, уравнение, фазовый портрет.

**Keywords:** economic modeling, direct and inverse problems, equation, phase portrait.

## Введение

В настоящее время трудно найти какую-либо область исследования, где бы не использовалось моделирование, как способ отражения действительности.

И если изначально моделирование применялось преимущественно в технических исследованиях, то в настоящее время оно активно применяется и в гуманитарных науках, в первую очередь, экономических.

Необходимо подчеркнуть, что экономическое моделирование в последние годы является одним из самых распространенных в специальной литературе.

Среди первых исследований в данном направлении следует назвать работу Л.В. Канторовича «Математические методы организации и планирования производства» [1], которая послужила началом целому циклу работ в части экономического моделирования.

Как правило, процессы экономического моделирования включают следующие этапы:

- первый этап – формализация экономической модели и ее отладка;
- второй этап – насыщение модели статистической информацией и моделирование;
- третий этап – интерпретация результатов моделирования.

При этом для построения экономических моделей могут применяться два подхода:

- разработка моделей системы на основе анализа;
- разработка моделей системы на основе синтеза [2, 3].

Эти подходы соответствуют решениям прямой и обратной задач исследования операций, где показатель оценивания эффективности рассматриваемой модели (системы) определяется зависимостью  $F(g) = W$ . Соответственно подход на основе анализа предполагает оценку эффективности  $W$ , если решение является равным  $g = a$ . Подход на основе синтеза предполагает формирование  $g$  при заданном решении, т. е. когда  $W = const$  [4, 5, 6].

## Основная часть

Исторически сложилось так, что в экономике традиционно используются модели, разработанные на основе анализа, в которых закономерности в исследуемых областях в процессе моделирования далеко не в полной мере можно учесть. Достаточно высокий уровень риска при использовании разработанных на основе анализа моделей приводит к тому, что результаты не в полной мере соответствуют ожиданиям. Т.е. их использование далеко не полностью обеспечивает условия гарантированного достижения цели получения прибыли или экономического развития.

Для построения экономических моделей предлагается использовать методологию, предложенную в работах [2-3] и формализацию в дифференциальной форме моделей Лотки-Вольтерра [7].

Предложенный подход сведения связей экономических процессов к уравнениям Лотки-Вольтерра, позволяет довольно успешно применять их для задач моделирования



Боков С.И.



Пестун У.А.

долгосрочного сбалансированного развития в условиях экономической стабильности.

Достоверность получаемых результатов моделирования в этом случае базируется на использовании достоверных исходных данных в виде временных последовательностей характеристик экономического развития.

Такой подход позволяет достаточно полно учитывать динамику развертывания новых процессов и возможности динамического перераспределения различных ресурсов и в самом общем виде может быть представлен в виде системы дифференциальных уравнений практически любого порядка, например:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = ax - bxy + qxz \\ \frac{dy}{dt} = -py + cxy + \gamma yz, \\ \frac{dz}{dt} = \mu z - \tau xz - \delta yz. \end{cases}$$

где:  $\frac{dx}{dt}$  – скорость изменения показателя « $x$ », которая естественным образом связана с показателями « $y$ » и « $z$ »,  $\frac{dy}{dt}$  и  $\frac{dz}{dt}$  аналогичные производные показателей;

$a$  – коэффициент, отражающий естественные процессы изменения;

$b$  – коэффициент, отражающий влияние показателя на показатель;

$q$  – коэффициент, отражающий влияние показателя на показатель;

$p$  – коэффициент, отражающий естественные процессы изменения;

$c$  – коэффициент, отражающий влияние показателя на показатель;

$\gamma$  – коэффициент, отражающий влияние показателя на показатель;

$\mu$  – коэффициент, отражающий естественные процессы изменения;

$\tau$  – коэффициент, отражающий влияние показателя на показатель;

$\delta$  – коэффициент, отражающий влияние показателя на показатель.

При решении оптимизационной задачи, необходимо обеспечить максимальное значение одного из показателей, значения остальных выходных показателей должны быть заданы (ограничены в некоторых пределах), например:

$$x \approx x_d, y \approx y_d, \max z = z_t,$$

где:  $x_d$  – допустимое значение показателя;

$y_d$  – допустимое значение показателя.

При этом задача нахождения максимума показателя может быть формализована следующим образом:

$$F = z - e^{-\frac{(x-x_d)}{\Delta}} - e^{-\frac{(y-y_d)}{\Delta}} \Rightarrow \max$$

где:  $F$  – функционал, который необходимо максимизировать;

$e^{-\frac{(x-x_d)}{\Delta}}$  – штрафная функция социальной системы;

$e^{-\frac{(y-y_d)}{\Delta}}$  – штрафная функция экономической системы;

$\Delta$  – характеристика крутизны роста штрафной функции, определяется из особенности практической оптимизации.

Рассматриваемая система уравнений является квадратичной, соответственно ее анализ наиболее целесообразен с применением основ теории колебаний, что особенно характерно при рассмотрении и анализе экономических систем.

Для практического анализа применения результатов решения системы уравнений недостаточно использовать классические двумерные изображения, поскольку значения  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  могут совпадать или в абсолютном значении быть излишне загромождены (рисунок 1).

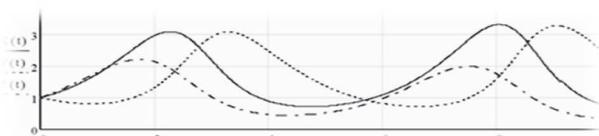


Рисунок 1. Иллюстрация численного интегрирования

Выходом для анализа системы уравнений является использование метода фазовых портретов, позволяющего вместо классических двумерных изображений использовать фазовые портреты, которые достаточно полно и емко отражают свойства рассматриваемых системы (рисунок 2).

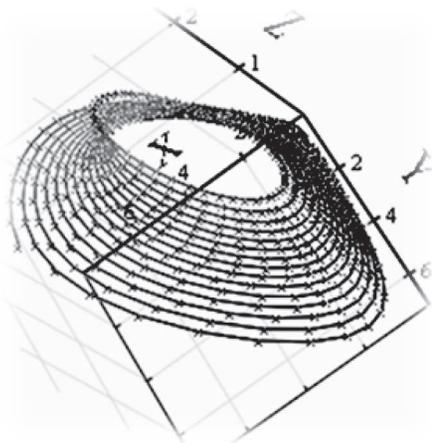


Рисунок 2. Фазовый портрет результатов моделирования

Учитывая, что рассматривается состояние из трех показателей, наиболее полным является рассмотрение фазовых портретов в трехмерном пространстве, где решение представляется в виде соответствующей спирали.

Для более обоснованной оценки и анализа локальных бифуркаций фазовых портретов вблизи особых точек и предельных циклов необходимо рассматривать только те

значения входных параметров, когда система дифференциальных уравнений из состояния устойчивого равновесия вырождается или переходит в хаос [8, 9].

### Заключение

Таким образом, в рамках данной работы:

- рассмотрены вопросы экономического моделирования, рассмотрена этапность проведения такого моделирования, рассмотрены подходы построения экономических моделей;
- для построения экономических моделей предложено использовать методологию, изложенную в работах [2-3] с формализацией в дифференциальной форме моделей Лотки-Вольтерра [7];
- предложен подход интерпретации результатов моделирования посредством применения метода фазовых портретов.

Необходимо отметить, что предложенный подход сведения связей экономических процессов к уравнениям Лотки-Вольтерра, может применяться только для моделирования в условиях экономической стабильности.

### Литература

1. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства Репринт. изд. / И.В. Романовский, сост., общ. ред.; Вс.Л. Канторович, вст. ст. – СПб.: С.-Петербург. Гос. Ун-та, 2012. – 96 с.
2. Бурлов В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов. Часть 1. (Методология. Методы) / В.Г. Бурлов. — СПб.: НП «Стратегия будущего», 2007. 265 с.
3. Бурлов В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов. Часть 2. (Модели. Технологии) / В.Г. Бурлов. — СПб.: НП «Стратегия будущего», 2007. 278 с.
4. Пестун У.А., Жуков А.О. Управление социальной и экономической системами в условиях требуемого уровня обороноспособности. Монография. – М.: ФГБУН «Аналитический центр» Минобрнауки России, 2017. – 144 с.
5. Буренок В.М. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем / Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. — М.: Машиностроение, 2011. — 334 с.
6. Анохин П.К. Избранные труды. Философские аспекты теории функциональной системы / Анохин П.К. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
7. Lotka A. Elements of Physical Biology. Baltimore, 1925. Reprinted by Dover in 1956 as Elements of Mathematical Biology
8. Акаев А.А. Замкнутая динамическая модель для описания и расчёта длинной волны экономического развития Кондратьева / Акаев А.А., Садовничий В.А. // Вестник Российской академии наук. — 2016. — Т. 86. — № 10. — С. 17–30.
9. Андронов А.А. Теория колебаний. 2-е изд., перераб. и испр / Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. — М.: Наука, 1981. — 918 с.



Автономная некоммерческая организация  
«Центр сертификации, обучения и  
консалтинга «Электронсертифика»  
**АНО «Электронсертифика»**

**СЕРТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА  
ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ РАЗРАБОТЧИКОВ,  
ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ И ПОСТАВЩИКОВ ЭКБ И РЭА**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ  
СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НАПРАВЛЕНИЯМ ПОДГОТОВКИ:**

- Система менеджмента качества. Требования;
- Подготовка экспертов по сертификации СМК и квалификации поставщиков ЭКБ;
- Внутренний аудит системы менеджмента качества предприятий и организаций;
- Задачи и функции поставщиков при осуществлении процессов закупки ЭКБ, ее идентификации, испытаний, хранения и поставки
- Входной контроль ЭКБ. Методы обнаружения контрафакта. Рекламационная работа;
- Организация функционирования испытательных лабораторий (центров);
- Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний ЭКБ и РЭА.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УСЛУГИ:**

- Системы менеджмента качества предприятий и организаций;
- Технология проведения испытаний ЭКБ в испытательных лабораториях (центрах);
- Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытаний ЭКБ и РЭА;
- Применение ЭКБ отечественного и иностранного производства.



141008, Московская область, г. Мытищи, ул. Матросова, д. 8, 2-й этаж, офис 9 и 19  
+7 (495) 055-05-99, e-mail: [elsert@bk.ru](mailto:elsert@bk.ru), сайт: [elsert.ru](http://elsert.ru)



# ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПРОДУКЦИИ ФГБУ «ВНИИР»



**Орган по сертификации продукции ФГБУ «ВНИИР» аккредитован в национальной системе аккредитации и включен в национальную часть единого реестра органов по сертификации**

**Проводит обязательную сертификацию продукции на соответствие требованиям Технических регламентов ЕАЭС:**

- Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 004/2011 «О безопасности низковольтного оборудования»
- Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств»
- Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования»

## **Выбирая нас, вы получаете:**

- Экспертов по сертификации с многолетним опытом;
- Сотрудничество с ведущими испытательными лабораториями;
- Работу в строгом соответствии с законодательством Российской Федерации;
  - Оперативное и качественное выполнение работ;
  - Оптимальное соотношение цены и качества.

## **Оказываем услуги по подтверждению соответствия в форме сертификации:**

- Электрические аппараты и приборы бытового назначения;
- Оборудование световое и источники света;
- Персональные электронные вычислительные машины (ПК);
- Низковольтное оборудование, подключаемое к персональным электронным вычислительным машинам;
- Машины сельскохозяйственные;
- Инструмент электрифицированный (машины ручные и переносные электрические);
- Выключатели автоматические, устройства защитного отключения;
- Аппараты для распределения электрической энергии;
- Аппараты электрические для управления электротехническими установками;
- Станки деревообрабатывающие бытовые;
- Оборудование гаражное для автотранспортных средств и прицепов
- Также иная продукция в соответствии с нашей Областью аккредитации.

[cb@vniir-m.ru](mailto:cb@vniir-m.ru)

<https://cb.vniir-m.ru/>

8 (495) 586-17-21, доб. 12-71

141002, Московская область, город Мытищи, улица Колпакова, дом 2А,  
4 этаж, пом. 40, 40а, 40б (внутр. № 444)