

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

«МОЛОДЕЖЬ И НАУКА»

Тезисы докладов

Часть 1

Москва

УДК 001(06)

ББК 72г

НЗ4

XIX Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. - 296с.

Сборник содержит тезисы докладов, включенных в программу XIX Международной телекоммуникационной конференции студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА», проводимой в сети Интернет в октябре-декабре 2015 года на сайте НИЯУ МИФИ <http://mn.mephi.ru/>.

Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: ядерная физика и энергетика; ядерная и радиационная безопасность; автоматика и автоматизация в атомной отрасли; микро- и нанoeлектроника; радиационно-стойкая электроника; физика плазмы и управляемый термоядерный синтез; лазерная физика; фотоника и информационная оптика; ядерная медицина и медицинская физика; физика пучков и ускорительная техника; компьютерные системы и технологии; информатика и процессы управления; кибернетика и безопасность; экономика и управление; методология инженерно-физического образования.

Книга предназначена молодым ученым, аспирантам и студентам, интересующимся тематикой представленных научных направлений.

Редколлегия: О.Н. Голотюк (ответственный редактор),
А.Н. Петровский, Л.Б. Беграмбеков, Д.С. Веселов, Н.Н. Евтихийев,
С.Д. Кулик, В.М. Немчинов, И.К. Новиков, А.М. Самохин,
Н.В. Малых, Т.Н. Бабенко, Г.П. Ишимова

Статьи сборника издаются в авторской редакции.
Материалы получены до 26.10.2015

ISBN 978-5-7262-2221-9

© Национальный исследовательский
ядерный университет, 2015

Подписано в печать 25.11.2015. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 18.5 Тираж 175 экз. Заказ № 8

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Типография НИЯУ МИФИ.
115409, Москва, Каширское ш., 31*

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

АГАФОНОВ С.А., ИСЛАМГАЛИЕВ А.А., ОВСИЕНКО А.С. Научные руководители – ТЕРНОВЫХ М.Ю., ст. преподаватель ТИХОМИРОВ Г.В., д.ф.-м.н., доцент Возможность прогнозирования характеристик критичности и безопасности реактора БН-1200 на моделях ТВС	19
КУЗНЕЦОВ А.Н. Научный руководитель – ГОРОДКОВ С.С., к.ф.-м.н. Расчет полномасштабной двумерной активной зоны ВВЭР-1000 по детерминистической и стохастической программам	22
ЛИСТОВ А.С., ПРОШКИНА Е.Я. Научные руководители – ТЕРНОВЫХ М.Ю., ст. преподаватель ТИХОМИРОВ Г.В., д.ф.-м.н., доцент Анализ зависимости нейтронно-физических характеристик от начальных параметров реактора БН-1200	24
БОГДАНОВИЧ Р.Б. Научный руководитель – ТИХОМИРОВ Г.В., д.ф.-м.н., доцент Прецизионные расчеты вклада нейтронно-захватных реакций в энерговыделение ВВЭР-1000	26
НИКИТИН С.Н., ШОРНИКОВ Д.П., ТАРАСОВ Б.А. Научный руководитель – БАРАНОВ В.Г., к.т.н., профессор Разработка материала матрицы дисперсной топливной композиции с металлическим ядерным топливом	28
НАГОВИЦЫНА О.А. Научный руководитель – СЕРГИЕВСКИЙ В.В., д.хим.н., профессор Сольватация бромида лития в метаноле	30
БОГДАНОВА Е.В. Научный руководитель – ГОРОДКОВ С.С., к.ф.-м.н. Подавление ксеноновой неустойчивости в стохастических расчетах больших реакторов	32
ДЕНИСЕНКО А.О., ГАМЦЕМЛИДZE И.Д., ДЕНИСОВА М.О. Научный руководитель – НИКОНОВ С.П., к.т.н., с.н.с. Статистический анализ расчетно-экспериментального исследования переходных процессов, связанных с режимами отключения и подключения ГЦН на блоке № 4 Калининской АЭС	34

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ГОРЕНИЕ И ДЕТОНАЦИЯ

ТИХОНОВ С.Н.

Научные руководители – КУРЧАТОВ И.М., к.ф.-м.н., доцент

ЛАГУНЦОВ Н.И., к.ф.-м.н., доцент

Совокупность процессов при очистке воды с использованием

алюмокремниевого коагулянта36

МАТЯТИНА А.Н.

Научный руководитель – КАЛАШНИКОВ Н.П., д.ф.-м.н., профессор

Механизмы дополнительного выделения энергии в металлических

объектах при фазовых переходах38

ЮСУПОВ А.Н.

Научный руководитель – КУПРИЯНОВ А.С., научный сотрудник

Определение эффективности регистрации бета-излучения

$^{90}\text{SR}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}SR на установке QUANTULUS 1220.....40

ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

КАЛМЫКОВА Д.Е.

Научный руководитель – БУБЛИКОВА И.А., к.т.н., доцент

Исследование динамики концентрации тяжелых металлов в воде

водоёма-охладителя Ростовской АЭС.....42

БАРАНОВА М.А.

Научные руководители – БОЙКО А.В., начальник лаборатории

КИРЕЕВ В.П., инженер РНТ

КОВАЛЕНКО В.Г., к.ф.-м.н.

Устройство детектирования на основе алмаза44

ЧЕПАЙКИН И.А.

Научный руководитель – ЯКОВЛЕВ Д.Ю., аспирант

Обращение с ЗРНИ, их захоронение и улучшение эффективности

ядерного регулирования46

КУЛИКОВ И.С.

Научные руководители – БОЙКО А.В., начальник лаборатории

– КИРЕЕВ В.П., инженер РНТ

– КОВАЛЕНКО В.Г., к.ф.-м.н.

– ПЕТРОВ В.И., инженер РНТ

Широкодиапазонный блок детектирования нейтронов48

ГАЛАНОВА М.Н.

Научный руководитель – БУБЛИКОВА И.А., к.т.н., доцент

Динамика выбросов Ростовской АЭС инертных радиоактивных

газов и йода-13150

АКОБЯН Д.А.

Научный руководитель – СЛОБОДЧУК В.И., к.т.н., доцент

Температурный режим отработанных ТВС в бассейне выдержки

РБМК-1000 при частичной потере охлаждающей воды.....52

АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

ЧУМАКОВ А.А., НОВОСЕЛЬЦЕВ А.В., ФЕДОРЕНКО Д.Н.,

ИВАНЫЧЕВА А.Н.

Научный руководитель – КРАВЧЕНКО П.Д., д.т.н., профессор

Обоснование конструктивной схемы траверсы для автоматического

захвата трубных изделий53

НИКОЛАЕВА Д.В.

Научный руководитель – СЕМЕНОВ И.Б., к.ф.-м.н.

Макет системы управления стендом для тестирования порт-плагов

установки ИТЭР55

ЧУМАКОВ А.А., ФЕДОРЕНКО Д.Н., ИВАНЫЧЕВА А.Н.

Научный руководитель – КРАВЧЕНКО П.Д., д.т.н., профессор

Обоснование конструктивной схемы автоматического захвата

цилиндрических объектов56

ЗУБКОВ И.О.

Научный руководитель – КРАВЧЕНКО П.Д., д.т.н., профессор

Система управления при перегрузке различных объектов машиной

МПК с гибким подвесом грузозахватных устройств58

ТАЛАЛАЙ А.С.

Научный руководитель – КРАВЧЕНКО П.Д., д.т.н., профессор

Совершенствование системы управления перегрузочной машиной

с гибким подвесом объектов перегрузки в ядерном реакторе типа ВВЭР60

ЦАПЛИН М.А.

Научный руководитель – МАСЛЕННИКОВ В.В., д.т.н., профессор

Обоснование выбора параметров PID-регулятора с целью повышения

быстродействия системы автоматического регулирования сканирующего

зондового микроскопа62

МАКСИМКИН А.И., СЕМЕНЕНКО А.Н., ФРОЛОВ М.А., КРЮКОВ И.С.

Научный руководитель – ТУТНОВ И.А., д.т.н., профессор

Применение систем импульсного питания детекторов ионизирующего

излучения64

ЙЕ НАУНГ

Научный руководитель – ЩАГИН А.В., д.т.н., профессор

Режимы регулирования сервоприводов на высокоточных системах

позиционирования66

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА, МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГОНАПРЯЖЕННОЙ ТЕХНИКИ

ВАЛИКОВ Р.А.

Научный руководитель – ВОЛКОВ Н.В., к.т.н., доцент

Разработка метода повышения эксплуатационных свойств
длинномерных изделий методом ионного легирования
приповерхностных слоев 67

ЯШИН А.С.

Научный руководитель – ВОЛКОВ Н.В., к.т.н., доцент

Создание антикоррозионных барьерных слоев на материалах
для ядерной техники методами ионно-пучковых технологий 68

ЧЕКАНОВ С.В.

Научные руководители – ИСАЕНКОВА М.Г., д.ф.-м.н., профессор

ПЕРЛОВИЧ Ю.А., д.ф.-м.н., профессор

Особенности деформации сверхупругого сплава Ti-22%Nb-6%Zr
по данным рентгеновского текстурного анализа 69

ДОБРОХОТОВ П.Л.

Научный руководитель – ИСАЕНКОВА М.Г., д.ф.-м.н., профессор

Формирование текстурной и субструктурной неоднородности в трубах
из нанокompозитных ферритно-мартенситных ДУО сталей 71

МИХАЛЬЧИК В.В.

Научный руководитель – БАРАНОВ В.Г., к.т.н., с.н.с.

Исследование термической стабильности перспективных композиций
нитридного ядерного топлива для реакторов IV поколения 73

УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ (НАНО-) МАТЕРИАЛЫ

ТАРАНОВ Н.С.

Научный руководитель – ЛИТИНОВА Т.А., к.т.н., доцент

Модернизация установки электроконтактного уплотнения 75

КАРПИХИН А.Е.

Научный руководитель – ШАМРАЙ В.Ф., д.ф.-м.н., профессор

Исследование структурно-фазовых состояний порошков
 α -трикальцийфосфата, подвергнутых механоактивации
и последующему отжигу 77

НАНОЭНЕРГЕТИКА, МОЛЕКУЛЯРНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

ТИШИН А.А.

Научные руководители – ЛАГУНЦОВ Н.И., к.ф.-м.н., доцент

КУРЧАТОВ И.М., к.ф.-м.н., доцент

Комплекс для исследования разделительных свойств цеолитов

и активированных углей79

СКУРИДИН И.Е.

Научные руководители – ЛАГУНЦОВ Н.И., к.ф.-м.н., доцент

КУРЧАТОВ И.М., к.ф.-м.н., доцент

Обратный асимметричный газотранспортный эффект в полимерных

мембранах81

МИТРОФАНОВА А.С.

Научный руководитель – БЫРКИН В.А., к.ф.-м.н., ассистент

Аналитическое описание модели системы перекрывающихся

сфер различных размеров для неупорядоченной пористой среды83

ЛИХОМАНОВА П.А.

Научные руководители – ТРОНИН И.В., к.ф.-м.н.

ГРЕХОВ А.М., к.ф.-м.н.

Разработка пакета программ для расчета параметров транспорта

и структуры гибридных мембран84

БОРТНИКОВА С.А.

Научный руководитель – БЕЛОГОРЛОВ А.А., к.ф.-м.н., доцент

Разработка аппаратно-программного комплекса для определения

структуры пористых сред86

КАРАСЕВА М.Д.

Научные руководители – ЛАГУНЦОВ Н.И., к.ф.-м.н., доцент

КУРЧАТОВ И.М., к.ф.-м.н., доцент

Оптимизация технологической схемы очистки и осушки

природного газа87

ГУРКИН В.Н.

Научный руководитель – ЛАГУНЦОВ Н.И., к.ф.-м.н., доцент

Организация рецикла в гибридной мембранно-сорбционной

газоразделительной системе при помощи эжекторного смесителя89

МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

ОСИПОВА Т.А.

Научный руководитель – УЗИКОВ В.А.

Экспериментальные реакторные устройства для облучения

конструкционных материалов водо-водяных реакторов91

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

КОСМЫНЦЕВА А.В.

Научный руководитель – ФОМИН Д.К., д.мед.н., профессор

Оптимизация конструкции аппликатора для внутритрипостной
брахитерапии печени при использовании Re^{188} 93

САДЫХОВ Э.Г.

Научный руководитель – СЕМЕНОВА Н.А., д.б.н., гл.науч.сотр.

Измерение локальной концентрации протонсодержащих метаболитов
и параметров диффузии в структурах головного мозга у детей с
сотрясением головного мозга в остром периоде95

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ

БИРЮКОВА К.С.

Научный руководитель – ЛЕБЕДЕВ В.В., д.т.н., профессор

Измеритель критической частоты слияния мерцаний для оперативной
оценки состояния пациента97

КОЗЛОВ И.В.

Научные руководители – ЕЛІМАНОВ Г.Н., к.т.н., доцент

ГУДОШНИКОВ С.А., к.ф.-м.н., в.н.с.

Исследование физико-механических и магнитных свойств композиционных
микропроводов с эффектом гигантского магнитного импеданса99

СКОРОХОВОВ И.С.

Научный руководитель – ТИХОМИРОВА А.Н., к.т.н., доцент

Унификация программных интерфейсов электронных измерительных
и регулирующих устройств101

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СКВОРЦОВА А.А.

Научный руководитель – ЛЕБЕДЕВ В.В., д.т.н., с.н.с.

Физика шага в рефлекторном тренажёре102

ФЛОРЕНЦЕВ В.В.

Научный руководитель – РЕЗАЕВ Р.О., к.ф.-м.н.

Многофункциональный запястный браслет-холтер HGAzer104

АШИККАЛИЕВА М.Х., ПОЛЯКОВ Е.В.

Научный руководитель – НИКИТАЕВ В.Г., д.т.н., профессор

Исследование информативности бластных клеток на препаратах
периферической крови и аспиратах костного мозга при распознавании
острых лейкозов107

БЫКОВ А.О.

Научные руководители – КОКОВ З.А., к.ф.-м.н., доцент

ЩЕРБИН С.Л., к.биол.н.

Внедрение новых технологий диагностики и лечения статического
сколиоза108

МЕЛЬНИКОВА Ю.А.

Научный руководитель – МОРОЗОВА О.Л., д.мед.н., профессор

Разработка способа прогнозирования гипоксического
повреждения почек109

РАДИАЦИОННО-СТОЙКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

ВИНОГРАДОВ С.М.

Научный руководитель – АТКИН Э. В., к.т.н., доцент

Кольцевой генератор на параметризуемых кольцевых
N-канальных транзисторах.....111

ВИНОГРАДОВ С.М.

Научный руководитель – АТКИН Э. В., к.т.н., доцент

Развитие цифровой радиационно-стойкой библиотеки
на параметризуемых кольцевых N-канальных транзисторах.....113

ВИНОГРАДОВ С.М.

Научный руководитель – АТКИН Э. В., к.т.н., доцент

Синхронный Т-триггер на параметризуемых кольцевых
N-канальных транзисторах.....115

РАЗУМНЫЙ В.В., ГАРАФУТДИНОВ М.И.

Научный руководитель – ЗЕБРЕВ Г.И., д.т.н., профессор

Расчет сечений сбросов ячеек памяти от прямой ионизации протонами.....117

ДОМОЖАКОВ Д.А., РАННЕВ Н.Ю.

Научный руководитель – КОНДРАТЕНКО С.В., к.т.н., доцент

Сравнение характеристик многофазных генераторов управляемых
напряжением119

СТРЕЛЬЦОВ В.Н.

Научный руководитель – СТЕНИН В.Я., д.т.н., профессор

Подход к применению техники фиктивной симметрии
в комбинационных элементах в составе логических блоков121

КОБЫЛЯЦКИЙ А.В., СЕРГЕЕВ Д.К.

Научный руководитель – ГЕРАСИМОВ Ю.М.

Моделирование переходных процессов от попадания ТЗЧ в логической
цепи с проектной нормой 90 нм.....123

АНТОНЮК А.В.

Научный руководитель – СТЕНИН В.Я., д.т.н., профессор

Кэш ОЗУ по объемной технологии КМОП 28 нм.....125

ТИТОВА М.И.

Научный руководитель – АМБУРКИН К.М., аспирант

Формирователь синхроимпульса с гальванической развязкой

для проведения радиационных испытаний127

ЛЕВИН К.Э.

Научный руководитель – СТЕНИН В.Я., д.т.н., профессор

Помехоустойчивый блок шифратора (N, K) по технологии 28 нм КМОП129

ЖИДКОВ Н.М.

Научный руководитель – УСАЧЕВ Н.А., к.т.н.

Сравнительный анализ схем построения усилителей мощности

СВЧ-диапазона, выполненных по КМОП КНИ технологии131

МОЖАЕВ И.А., КОСТЮЧЕНКО Д.С.

Научный руководитель – НЕКРАСОВ П.В., к.т.н., доцент

Автоматизированная система тестирования аудиокодека.....133

ЛОСКУТОВ И.О., КАРАКОЗОВ А.Б.

Научный руководитель – НЕКРАСОВ П.В., к.т.н., доцент

Автоматизированная система управления и тестирования

микроконтроллеров со встроенным АЦП.....134

ОМАР К.М., МОСКАЛЕНКО К.А.

Научные руководители – НЕКРАСОВ П.В., к.т.н., доцент

КАРАКОЗОВ А.Б., ассистент

Функциональный и параметрический контроль датчиков температуры

с помощью модуля NI MyRIO136

ДЯТЛОВ Н.С.

Научные руководители – СКОРОБОГАТОВ П.К., профессор

ЕПИФАНЦЕВ К.А., инженер

Автоматизация проведения исследований ИС на подпороговый эффект.....138

КОРОТЕЕВ М.Е.

Научный руководитель – ДЕМИДОВА М.Е., инженер

Нелинейность передаточной характеристики датчиков TMP36FSZ

от дозового воздействия в диапазоне температур140

ЛОСКУТОВ И.О., ШВЕЦОВ-ШИЛОВСКИЙ И.И.

Научный руководитель – НЕКРАСОВ П.В., к.т.н., доцент

Аппаратно-программный комплекс для тестирования микросхем

прямого цифрового синтеза142

МАРФИН В.А.

Научный руководитель – НЕКРАСОВ П.В., к.т.н., доцент

Разработка интерфейса внешней памяти для тестирования

работоспособности микропроцессоров цифровой обработки сигналов.....144

НОВИКОВ А.А., ПЕЧЕНКИН А.А.

Научный руководитель – ЧУМАКОВ А.И., д.т.н., профессор

Испытания ИС на стойкость к воздействию ТЗЧ

в диапазоне эксплуатационных температур с использованием

лазерных методов.....146

СОРОКОУМОВ Г.С.

Научный руководитель – ЧУМАКОВ А.И., д.т.н., профессор

Схемотехнический подход к оценке длительности одиночных
переходных событий – SET148

ШАРИПОВА А.Р., КОЛОСОВА А.С.

Научный руководитель – ДАВЫДОВ Г.Г., к.т.н.

Исследование радиационного поведения микросхем SN74АНС14D
и SN74LVC14ADR компании Texas Instruments150

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

ШУМКИН О.В.

Научный руководитель – АТКИН Э. В., к.т.н., доцент

Цифровое устройство контроля фазы и автоподстройки частоты.....152

ОРЛОВ В.В., ФЕЛИЩИН В.А.

Научный руководитель – ЗЕБРЕВ Г.И., д.т.н., профессор

Моделирование входных характеристик МОП-транзистора
при разных температурах154

САГДИЕВ И. Г.

Научный руководитель – АТКИН Э. В., к.т.н., доцент

Сложнофункциональный блок предустановки порогов компараторов
в интегральном исполнении.....156

ОБЛОВ К.Ю.

Научный руководитель – САМОТАЕВ Н.Н., к.т.н., доцент

Разработка и изготовление тестовых маломощных микронагревателей
методом лазерной микрообработки керамических материалов.....158

ИВАНОВА А.В.

Научный руководитель – САМОТАЕВ Н.Н., к.т.н., доцент

Изготовление экспериментальной установки послойного
разравнивания порошковых материалов.....160

СОЛОВЬЕВ С.А.

Научный руководитель – САМОТАЕВ Н.Н., к.т.н., доцент

Разработка экспериментальной установки прямой печати
проводящими материалами162

ГЕРАСИМЧУК А.В., КОБЗАРЬ М.С., ЖИХАРЕВ Г.Ю.

Научный руководитель – ШАГУРИН И.И., д.т.н., профессор

Организация конвейерной обработки данных для повышения
производительности криптоблоков, используемых в составе
«систем на кристалле»163

ЩИГОРЕВ Л.А.

Научный руководитель – ШАГУРИН И.И., д.т.н., профессор

Методы повышения сбое- и отказоустойчивости элементов встроенной
статической оперативной памяти165

ЕСЕНЬКОВ К.А., ЖИХАРЕВ Г.Ю.	
Научный руководитель – ШАГУРИН И.И., д.т.н., профессор	
Универсальный исполнительный модуль для аппаратной реализации алгоритмов хеширования в составе «систем на кристалле».....	167
ГЕРАСИМЧУК А.В., КОБЗАРЬ М.С.	
Научный руководитель – ШАГУРИН И.И., д.т.н., профессор	
Разработка криптоблока, реализующего дешифрацию в соответствии алгоритмом DES, для программируемых логических интегральных схем ...	169
МАРЬИНА Е.В., ИМАМЕТДИНОВ Э.Ф.	
Научный руководитель – КРАСНЮК А.А., к.т.н., доцент	
Исследование термостабильности МОП-транзистора с периодически легированным каналом.....	171
ЗЕМЦОВ К.С.	
Научный руководитель – ЗЕБРЕВ Г.И., д.т.н., профессор	
Компактная модель для оценки интенсивности сбоев при воздействии ТЗЧ в космическом пространстве.....	173
ДЕМЕНТЬЕВ В.В.	
Научный руководитель – ШАГУРИН И.И., д.т.н., профессор	
Программная модель конвейерного исполнения команд процессора NM6407	175
ДОМОЖАКОВ Д.А., РАННЕВ Н.Ю.	
Научный руководитель – КОНДРАТЕНКО С.В., к.т.н., доцент	
Устройство корректировки фаз сигналов для многофазных генераторов управляемых напряжением (ГУН)	177
ИМАМЕТДИНОВ Э.Ф.	
Научный руководитель – ВЛАСОВ А.О.	
Оптимизация параметров микросхемы подбором входных библиотечных данных в условиях техпроцесса 28 нм.....	179
СМИРНИЦКИЙ Н.С.	
Научный руководитель – ВЕСЕЛОВ Д.С., к.т.н.	
Диффузионная сварка диэлектриков	181
ДОВГОПОЛАЯ Е.А.	
Научный руководитель – МАСЛЕННИКОВ В.В., д.т.н., профессор	
Приближенные формулы определения добротности систем четвертого порядка	183
ЧЕБАН Н.О., СУДАРЕВ А.А.	
Научный руководитель – МАСЛЕННИКОВ В.В., д.т.н., профессор	
Расширение частотного диапазона активных звеньев второго порядка, выполненных на одном операционном усилителе	184
ГАЙБУРА А.В.	
Научный руководитель – ВЕСЕЛОВ Д.С., к.т.н.	
Устройство для химического травления	186
МАРЬИНА Е.В.	
Научный руководитель – ВЛАСОВ А.О.	
Адаптация топологического размещения элементов микросхемы при переходе к 28 нм технологическим нормам	188

МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОФИЗИКА

БАЙКОВА О.А.

Научные руководители – СТРИХАНОВ М.Н., д.ф.-м.н., профессор

БАЙКОВ А.Ю., к.ф.-м.н., доцент

Разработка проекта функциональной части мощного клистрона с КПД
около 90 % для прямого преобразования электроэнергии в СВЧ-энергию190

КЛАДКО С.Г.

Научный руководитель – ШКОЛЬНИКОВ Э.Я., д.ф.-м.н.

Оптимизация рабочих параметров ионного источника газовой

нейтронной трубки192

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

АЛХИМОВА М.А.

Научные руководители – САВЁЛОВ С.А., д.ф.-м.н., профессор

ПИКУЗ С.А., к.ф.-м.н.

Спектральный анализ сверхъяркого источника рентгеновского излучения,
формирующегося в плотной релятивистской лазерной плазме195

ЕФИМОВ В.С., ПОСКАКАЛОВ А.Г.

Научный руководитель – ПИСАРЕВ А.А., д.ф.-м.н., профессор

Определение содержания гелия в вольфрамовом «пухе» методом

термодесорбционной спектроскопии197

ФИЛИППОВ Е.Д.

Научный руководитель – САВЁЛОВ С.А., д.ф.-м.н., профессор

Создание диагностической системы на основе интерферометра

Маха–Цендера для выбора материала мишени и исследования

модифицированных поверхностей199

ГРИГОРЬЕВА И.Г.

Научный руководитель – САВЁЛОВ С.А., д.ф.-м.н., профессор

Кординатно-чувствительный спектрометр импульсного рентгеновского

излучения для исследования пространственной структуры

плазменных объектов201

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ

МОРОЗ А.Н.

Научный руководитель – КАШУРНИКОВ В.А., д.ф.-м.н., профессор

Моделирование двумерных вихревых структур в слоистых

сверхпроводниках второго рода203

ЩЕРБАКОВ А.С.

Научные руководители – ПЕТРОВ В.И., к.ф.-м.н., доцент

ПОПОВ В.В., д.хим.н., с.н.с.

Определение кислородного индекса в ВТСП типа $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 205

СИДОРЕНКО А.А.

Научные руководители – СЕВРЮКОВ О.Н., к.т.н., доцент

МОРОХОВ П.В., главный инженер

Разработка и получение неразъёмных высокопрочных соединений
титановых сплавов, полученных методом диффузионной пайки

с использованием аморфных припоев.....207

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

КОЛОБОВА Я.С.

Научный руководитель – РЕШЕТОВ В.Н., к.ф.-м.н., доцент

Требования к обеспечению единства измерений в наноиндустрии..... 209

РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

ДОВГОПОЛАЯ Е.А.

Научные руководители – МАСЛЕННИКОВ В.В., д.т.н., профессор

МЕЩЕРЯКОВ В.В., к.т.н., доцент

Анализ возможностей демпфирования колебаний в замкнутой
системе автоматического регулирования сканирующего зондового
микроскопа211

ПЕТРЕНКО Д.В.

Научный руководитель – ДМИТРЕНКО В.В., д.ф.-м.н., профессор

Перспективы создания детектора колодезного типа на сжатом ксеноне213

САЛОМАСОВ В.А.

Научные руководители – ФИЛИППОВ В.П., д.ф.-м.н., профессор

ЛАГУНЦОВ Н.И., д.ф.-м.н., доцент

Определение валентного состояния атомов железа в реагенте
по очистке воды методом мёсбауэровской спектроскопии215

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ЕГОРОВ А.М., НОВИКОВ П.Г.

Научный руководитель – ПОЛЕСКИЙ С.Н., к.т.н., доцент

Разработка автоматизированной системы проектирования
комплектов ЗИП.....217

ЯКОВЛЕВ И.П., ЦАРЕНКО А.В.

Научный руководитель – ПОЛЕСКИЙ С.Н., к.т.н., доцент

Разработка базы данных и программного средства для ее обслуживания
по системам обеспечения надёжности и качества аппаратуры219

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЁЖНОСТИ. АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

ЛЕБЕДЕВ М.А.

Научные руководители – БАРАНОВ В.Г., к.т.н., профессор

ШОРНИКОВ Д.П., к.т.н., с.н.с.

Создание установки и методики для определения температуры
плавления модифицированного оксидного ядерного топлива.....221

КОРОЛЕВ П.С.

Научный руководитель – ИВАНОВ И.А., к.т.н.

Методика ускоренных испытаний на ресурс электрорадиоэлементов.....223

БОРОВКОВ П.Ю.

Научный руководитель – БУБЛИКОВА И.А., к.т.н., доцент

Анализ нарушений в работе АЭС с реакторами РБМК-1000.....225

РИМАШЕВСКАЯ Е.Д.

Научный руководитель – ЧИЖ В.А., к.т.н., доцент

Анализ технологий переработки жидких радиоактивных отходов
и отработанных ионообменных смол АЭС.....227

ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА В ЯДЕРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

КОЛОБОВА Я.С.

Научные руководители – АЛЮШИН М.В., доцент

АФОНАСОВ А.А., ведущий инженер

Вариант системы обогасающего контроля229

КУРИЛКИН М.О.

Научный руководитель – ДЕРГУНОВА Е.А., к.т.н., доцент

Реализация технологии изготовления Nb_3Sn сверхпроводников
методом «порошок в трубе».....231

АЛЯЕВ И.В.

Научный руководитель – СЕЛЯЕВ Н.А., ведущий инженер

Макет имитатора сигналов ионизационных камер деления.....232

КОСТИКОВ В.О.

Научный руководитель – ВОЛКОВ Ю.Н., к.т.н.

Малые модульные реакторы: взгляд на будущее атомной энергетики234

КОВАЛЕВА О.Н.

Научный руководитель – ПИМШИН Ю.И., д.т.н., профессор

Оценка технического состояния защитных герметичных
оболочек (ЗГО).....236

ГУСЕВА Л.Ю., СТАЛЬЦОВ М.С., БОГАЧЕВ И.А.

Научный руководитель – ЧЕРНОВ И.И., д.ф.-м.н., профессор

Особенности формирования гелиевой пористости в поверхностном
слое конструкционных материалов первой стенки ТЯР.....238

ТЕХНОЛОГИИ ЗАМЫКАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

САЛЬДИКОВ И.С.

Научный руководитель – **ТИХОМИРОВ Г.В.**, д.ф.-м.н., доцент

Моделирование рецикла топлива в замкнутом ядерном топливном цикле на модели активной зоны реактора БН-1200240

СМИРНОВ А.Д.

Научный руководитель – **ТИХОМИРОВ Г.В.**, д.ф.-м.н., доцент

Разработка тестовых задач для верификации нейтронно-физических кодов на возможность расчета характеристик режима рецикла ядерного топлива в реакторе БН-1200.....241

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ДОВГОПОЛАЯ Е.А.

Научный руководитель – **МАСЛЕННИКОВ В.В.**, д.т.н., профессор

Обобщение алгоритма ускоренного приближенного вычисления корней кубических уравнений с коэффициентами любого знака243

МАЯКОВА О.Ю., АЛЕЙНИКОВ А.В., ПОЛЕССКИЙ С.Н.

Научный руководитель – **ВОСТРИКОВ А.В.**

Анализ моделей оценки надежности радиочастотных жгутов245

АНТОНОВА А.М.

Научные руководители – **УЛАНОВА А.В.**, к.ф.-м.н., доцент

СКОРОБОГАТОВ П.К., д.т.н., профессор

Моделирование кремниевого p-n-перехода в COMSOL Multiphysics методом конечных элементов.....247

ХУНОВ Т.Х.

Научный руководитель – **ПОЛЕССКИЙ С.Н.**, к.т.н., доцент

Сравнительный анализ показателей долговечности различных типов соединений печатного монтажа249

ПАНЬКОВСКИЙ Б.Е.

Научный руководитель – **ПОЛЕССКИЙ С.Н.**, к.т.н., доцент

Особенности расчета оценки комплекта ЗИП251

ФОТОНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПТИКА

НЕБАВСКИЙ В.А.

Научный руководитель – **СТАРИКОВ Р.С.**, д.ф.-м.н.

Разработка математической модели радиофотонной системы измерения сигнала, использующей растяжение сигнала по времени253

ОВЧИННИКОВ Д.С., МАЦАК И.С.

Научный руководитель – **ТУГАЕНКО В.Ю.**, к.ф.-м.н.

Разработка прототипа системы оптической связи с пассивным передатчиком.....255

РАЗУВАЕВ А.Е., МАЦАК И.С.

Научный руководитель – ТУГАЕНКО В.Ю., к.ф.-м.н.

Разработка пассивной системы охлаждения лазерных диодов на основе материала с изменением фазы256

РОГОВ П.Ю.

Научный руководитель – БЕСПАЛОВ В.Г., д.ф.-м.н.

Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на глаза и кожные покровы: математические модели.....258

ФАРРАХОВА Д.С., КУЗНЕЦОВА Ю.О.

Научный руководитель – ЛОЩЕНОВ В.Б., д.ф.-м.н.

Лазерно-индуцированная флюоресцентная диагностика ранней стадии кариеса с применением наночастиц фталоцианина алюминия.....260

ШАРОВА А.С., МАКЛЫГИНА Ю.С.

Научный руководитель – ЛОЩЕНОВ В.Б., д.ф.-м.н.

Бактериохлорин в роли ИК – фотосенсибилизатора для диагностики и терапии глубокозалегающих опухолей мозга.....261

ОСИПОВ Е.В., ДОВЖЕНКО Д.С.

Научные руководители – ЧИСТЯКОВ А.А., д.ф.-м.н., профессор

МАРТЫНОВ И.Л., к.ф.-м.н., доцент

Тушение фотолюминесценции сопряженных полимеров, внедренных в микрорезонатор из пористого кремния, под действием паров нитроароматических соединений263

ДОВЖЕНКО Д.С., ОСИПОВ Е.В.

Научные руководители – ЧИСТЯКОВ А.А., д.ф.-м.н., профессор

МАРТЫНОВ И.Л., к.ф.-м.н., доцент

Исследование усиления спонтанного излучения люминофоров в фотонных кристаллах как эффективный способ увеличения чувствительности сенсоров на их основе265

ПЕТРОВА Е.К.

Научный руководитель – СТАРИКОВ Р.С., д.ф.-м.н.

Моделирование инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений объектов в условиях поворота267

ПЕТРОВА Е.К., ПЯНКОВ С.С.

Научный руководитель – СТАРИКОВ Р.С., д.ф.-м.н.

Исследование возможностей синтеза инвариантных корреляционных фильтров на базе искусственных настроечных наборов, полученных путём манипуляции характеристиками реальных изображений269

ВОВК Т.А., НИКОЛАЕВА Т.Ю.

Научный руководитель – ПЕТРОВ Н.В., к.ф.-м.н.

Калибровка метода оценки объема с частицами на основе отношения пика корреляционной функции к пьедесталу271

НИКОЛАЕВА Т.Ю.

Научный руководитель – ПЕТРОВ Н.В., к.ф.-м.н.

Идентификация частиц в объеме методами пороговой обработки
и «шахматной доски»272

ШИФРИНА А.В.

Научный руководитель – ЕВТИХИЕВ Н.Н., д.ф.-м.н., профессор

Разработка методов повышения отношения сигнал/шум
и увеличения криптостойкости в системах оптического кодирования
с пространственно-некогерентным освещением за счёт дополнительного
применения входных амплитудных масок274

БОНДАРЕВА А.П., ЭРЬКИН И.Ю.

Научный руководитель – КРАСНОВ В.В., к.ф.-м.н.

Оптическое кодирование серии изображений с использованием набора
кодирующих ключей в схеме с пространственно-некогерентным
освещением на базе двух ЖК ПВМС276

БЕРДЫШЕВА С.А.

Научный руководитель – КРАСНОВ В.В., к.ф.-м.н.

Оптическое кодирование цифровой информации в виде QR-кодов
в пространственно-некогерентном монохроматичном свете278

БЕЛАШОВ А.В.

Научный руководитель – ПЕТРОВ Н.В., к.ф.-м.н.

Случайные и систематические ошибки в цифровой голографической
томографии280

КУРБАТОВА Е.А.

Научный руководитель – ЕВТИХИЕВ Н.Н., д.ф.-м.н., профессор

Разработка комбинированного метода сжатия цифровых голограмм
для медицинских и биологических приложений и систем трехмерного
наблюдения282

КУЛАКОВ М.Н., ПОРШНЕВА Л.А.

Научный руководитель – ЧЕРЁМХИН П.А., к.ф.-м.н.

Расчет киноформов объемных сцен методом «пинг-понг»284

ПОРШНЕВА Л.А., КУРБАТОВА Е.А.

Научный руководитель – ЧЕРЁМХИН П.А., к.ф.-м.н.

Методика моделирования записи и оптического восстановления
изображений с цифровых голограмм286

МОЛОДЦОВ Д.Ю.

Научный руководитель – ЕВТИХИЕВ Н.Н., д.ф.-м.н., профессор

Разработка методики оценки параметров DMD-модулятора для создания
на его основе устройства оптического распознавания объектов по форме
и спектру излучения288

Именной указатель авторов статей290

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



С.А. АГАФОНОВ, А.А. ИСЛАМГАЛИЕВ, А.С. ОВСИЕНКО
Научные руководители – М.Ю. ТЕРНОВЫХ, ст. преподаватель

Г.В. ТИХОМИРОВ, д.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРИТИЧНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРА БН-1200 НА МОДЕЛЯХ ТВС

По результатам расчетов полномасштабной модели БН-1200 и гетерогенной по высоте модели ТВС получены параметры корректировки основных функционалов и их неопределенность для обоснования использования модели ТВС в поисковых исследованиях.

Новые технические решения, принятые в проекте реактора БН-1200, предоставляют новые возможности поисковых исследований стартовых загрузок активной зоны (АЗ) и режимов выхода на равновесные перегрузки топлива. АЗ БН-1200 существенно отличается от АЗ работающих реакторов на быстрых нейтронах значительно большим диаметром и ее уплощением. Для поисковых исследований является актуальным вопрос соответствия результатов расчетов бесконечной решетки ТВС нейтронно-физическим характеристикам реактора.

В рамках независимого тестирования замороженных версий кодов, разработанных в рамках проекта «ПРОРЫВ», рассматривались различные модели БН-1200, в том числе детальная тестовая модель реактора [1] и гетерогенная по высоте модель ТВС. В данной работе анализируется возможность прогнозирования характеристик БН-1200 по результатам расчетов модели ТВС в аспекте корректного использования этой модели для поисковых исследований.

Расчетное моделирование проводилось в рамках цепочки: библиотеки БНАБ-93 и БНАБ-РФ, программа константного обеспечения CONSYST, программа ММК. Рассматривались составы нитридного топлива стартовой загрузки с различными векторами плутония (доля ^{239}Pu 60-69 %). Диапазон содержания PuN в топливе – 12-13,5 %. Анализировались коэф-

фициент размножения и основные реактивностные функционалы [2]. Для анализа были введены параметры корректировки функционалов REZ , полученные по результатам расчетов модели ТВС, для прогнозирования функционала реактора БН-1200:

$$A_i = REZ_{i \text{ реактор}} / REZ_{i \text{ ТВС}} .$$

На рис. 1 и 2 представлены некоторые результаты расчетов функционалов для составов топлива 1-2-3, полученные на моделях ТВС (индекс a) и реактора.

Анализ результатов показал, что параметры корректировки A в диапазоне рассмотренных топливных композиций для разных функционалов имеют различную неопределенность. Для коэффициента размножения неопределенность не превышает 0,05 %, что значительно меньше различия результатов, полученных по данным библиотек БНАБ 93 и БНАБ РФ. Использование параметров корректировки натриевого пустотного коэффициента позволяет прогнозировать характеристику реактора с неопределенностью менее 0,1 %. Существенно большая неопределенность прогнозирования функционалов, описывающих малые возмущения в реакторе – менее 10 %.

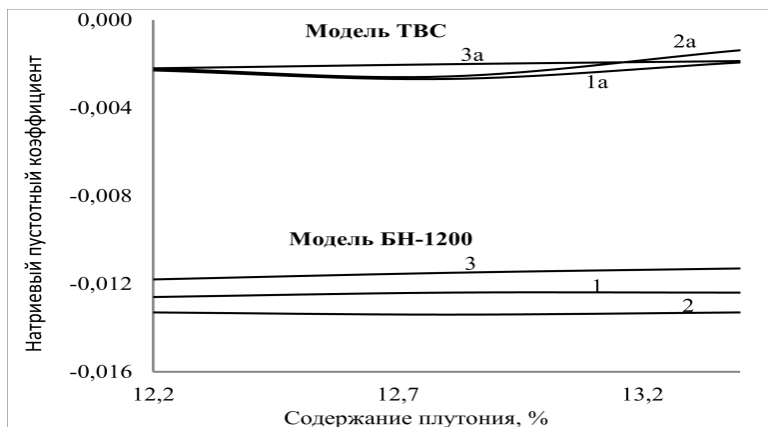


Рис. 1. Зависимость натриевого пустотного коэффициента от содержания плутония по данным БНАБ-93 для различных составов плутония

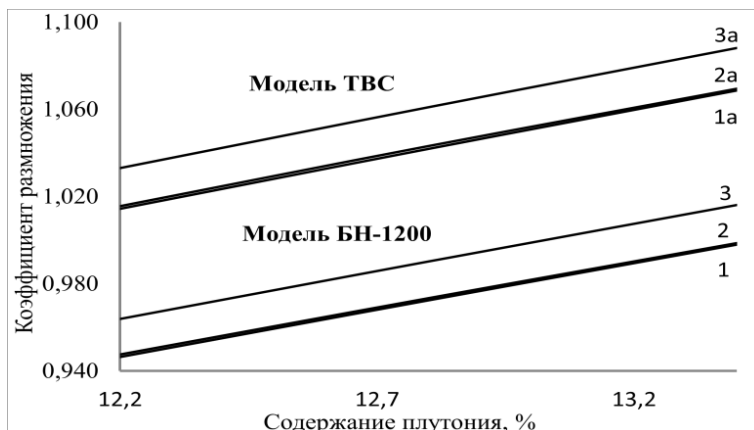


Рис 2. Зависимость коэффициента размножения реактора от содержания плутония по данным БНАБ-93 для различных составов плутония

Показано, что гетерогенная по высоте модель ТВС может быть использована для поисковых исследований в проекте БН-1200. Применение параметров корректировки основных функционалов позволяет прогнозировать характеристики реактора с вычисленной неопределенностью.

Список литературы

1. Белов С.Б., Киселев А.В., Марова Е.В. и др. Результаты верификации программ нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора типа БН-1200. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов, 2014, вып. 4, с. 66-76.
2. Зизин М.Н. Расчет нейтронно-физических характеристик реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1978.

А.Н. КУЗНЕЦОВ

Научный руководитель – С.С. ГОРОДКОВ, к.ф.-м.н.

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва

РАСЧЕТ ПОЛНОМАСШТАБНОЙ ДВУМЕРНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 ПО ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОЙ И СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММАМ

В работе проводится сравнение конечно-разностного расчета по детерминистической программе НЕМЗ, для которой полный набор ячеечных характеристик получен из программы MCU, с расчетом методом Монте-Карло полномасштабной двумерной активной зоны ВВЭР-1000.

Точные стохастические алгоритмы ограничены возможностями современных ЭВМ. Для ускорения получения расчетов используются быстрые детерминистические коды. Скорость таких программных кодов достигается за счет многих упрощенных приближений. Для оценки влияния используемых приближений сравниваются результаты детерминистических программ с результатами точных стохастических расчетов.

Сравнение расчетов производится для активной зоны ВВЭР-1000. Реактор со свежим топливом находится на минимальном контролируемом уровне мощности (МКУ).

Из расчета, проведенного в программе MCU [1], получены средние по выделенному объему сечения и коэффициенты диффузии для каждого объекта (ячейки). Из-за того, что приходится отыскивать характеристики около 85000 ячеек, можно сделать это не более чем в 4 энергетических группах нейтронов, так как иначе компьютерная память перегружается. Эти значения использовались при расчете по НЕМЗ [2] как наиболее точные. В НЕМЗ использовалось 1-, 2- и 4-групповое приближение.

Основные результаты этих расчетов представлены в таблице 1, где K_r – коэффициент неравномерности нейтронного поля по радиусу.

Таблица 1. Результаты расчетов

		K_{eff}	K_r
MCU		1.0434	1.892
НЕМЗ	1g	1.0424	1.806
	2g	1.0417	1.781
	4g	1.0397	1.747

Полученные значения эффективного коэффициенты размножения совпадают с точностью до 0,4%. Хорошее совпадение значений позволяет сравнивать другие характеристики.

На рисунке 1 показан поток тепловых нейтронов вдоль линии, проходящей через центр активной зоны.

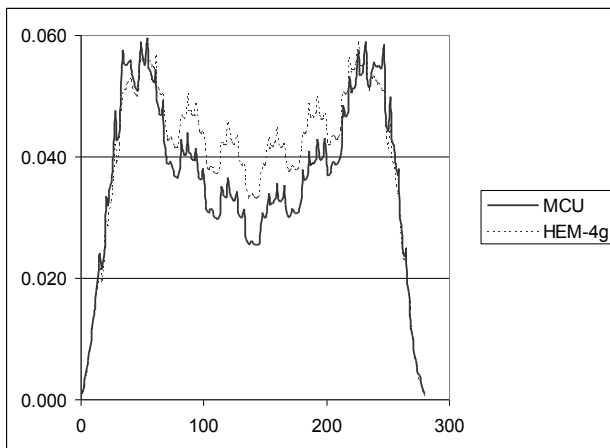


Рис. 1. Зависимость потока тепловых нейтронов от номера ячейки вдоль центральной линии

Обнаруженные систематические различия ожидалось, так как в большой активной зоне они могут быть совокупным результатом небольших статистических локальных различий и неопределенностей параметров.

В ходе работы полученные зависимости энерговыделения и потоков нейтронов схожи для обоих программ и можно заключить, что быстрый детерминистический код можно использовать для быстрого расчета большого количества вариантов с приемлемой точностью. Положительный результат сравнения может стимулировать будущие работы над гибридными стохастическо-детерминистическими программными кодами.

Список литературы

1. GOMIN E.A., MAJOROV L.V. et al., The Status of MCU-5, Physics of Atomic Nuclei, Vol. 75, No. 14, pp. 1634–1646 (2012).
2. S.S. GORODKOV, A. Vectorized Nodal-Type Algorithm for Large Power Reactor Coarse-Mesh Code HEM-3, Proc.Topic. Meet.on Adv. In React.Ph., Charleston, USA 1992, vol.1, p.87-98

А.С. ЛИСТОВ, Е.Я. ПРОШКИНА

Научные руководители – Г.В. ТИХОМИРОВ, д.ф.-м.н., доцент
М.Ю. ТЕРНОВЫХ, ст. преподаватель

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА БН-1200

На примере модели ТВС реактора БН-1200 рассмотрено изменение коэффициента размножения и накопление ^{239}Pu в зависимости от состава плутония начальной загрузки.

Среди многих возможностей быстрой энергетики стоит особо отметить воспроизводство ядерного топлива, которое существенно повышает экономическую привлекательность быстрых реакторов, позволяя перейти к замкнутому топливному циклу, что обеспечит ядерную энергетику топливом на сотни лет.

В данной работе был проведен нейтронно-физический расчет выгорания ТВС реактора. Использовалась гетерогенная по высоте модель ТВС, разделенная на 7 зон [1]. Данное разбиение представлено в рис. 1. Рассматривалась центральная твэльная ячейка ТВС БН-1200. Чехол ТВС и натрий межкассетного зазора не учитывались. Так же было введено приближение бесконечной решетки.

Тип зоны	КМ (низ)	A3 5	A3 3	A3 1	A3 2	A3 4	КМ (верх)

Рис. 1. Конфигурация модели ТВС

В расчете использовалась программа для прецизионных нейтронно-физических расчетов MCU [2]. Данная программа позволяет моделировать перенос нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов в различных трехмерных системах при помощи метода Монте-Карло.

Данный программный пакет позволяет учитывать эффекты непрерывного изменения энергии частицы при столкновениях, а также как непрерывную, так и ступенчатую зависимость сечений от энергии.

В качестве режима работы модели было выбрано разбиение на 6 микрокампаний по году и трёхлетней выдержки в ВРХ. Имелось три различных топливных состава уран-плутониевого нитридного топлива с одинаковым обогащением, но различающихся содержанием изотопов плутония, что позволило найти оптимальное соотношение между высоким воспроизводством и K_{eff} . За время работы происходит накопление ^{239}Pu , изменение массы по отношению к начальной загрузке представлено на рис. 2. Как видно, первый состав лучше в качестве наработки.

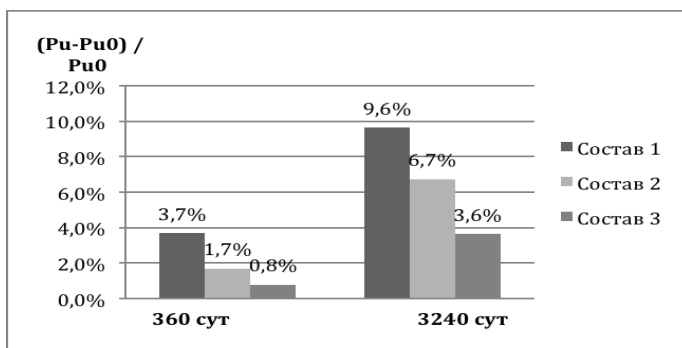


Рис. 2. Изменение массы $\text{Pu}239$ по отношению к его начальной загрузке

В отработавшем ядерном топливе содержится ^{240}Pu , являющийся источником нейтронов спонтанного деления. В оружейном плутонии максимально допустимое содержание ^{240}Pu составляет 6%. В данном ОЯТ его концентрация превышает 6%, что делает его непригодным для создания оружия. В процессе выгорания все три состава позволяют поддерживать условия критичности на протяжении всего времени работы моделируемой установки – 6 лет. Первый состав показал наименьший из трёх K_{eff} на начальный момент, что является плюсом с точки зрения безопасности.

Таким образом можно заключить, что первый состав является наилучшим из соображений безопасности и экономической целесообразности.

Список литературы

1. Апсе В.А., Савандер В.И., Тихомиров Г.В.. Физико-технические основы современной ядерной энергетики. Перспективы и экологические аспекты. //учебное пособие : М.: МИФИ, 2014 г. - 259 с.
2. Описание применения и инструкция для пользователей программ, собранных из модулей пакета MCU-5, под ред. Д.А. Шкаровского – 2012г. – 152 с.

Р.Б. БОГДАНОВИЧ

Научный руководитель – Г.В. ТИХОМИРОВ, д.ф.-м.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРЕЦИЗИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ВКЛАДА НЕЙТРОННО-ЗАХВАТНЫХ РЕАКЦИЙ В ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ ВВЭР-1000

Разработана методика расчета вклада захватной составляющей в энерговыделение ядерных реакторов. Методика протестирована на простейшей модели реактора ВВЭР-1000 с использованием программ MCU и MCNP. Проведен расчет двух типов модели ТВС ВВЭР-1000 (с выгорающим поглотителем и без него).

Расчет энерговыделения в ядерном реакторе играет большую роль как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации установки. На сегодняшний день в литературе присутствует множество грубых оценок энергии, выделяющейся в ядерном реакторе. Грубыми эти оценки можно назвать потому, что они не учитывают в полной мере захватную составляющую энерговыделения, связанную с реакциями захвата нейтронов (реакции типа (n,γ) , (n,α) и т.д.). Данная составляющая энерговыделения в основном определяется нуклидным составом активной зоны и нейтронным спектром в реакторе. Занижение или завышение эффективного энерговыделения в реакторе связанное с недочетом в методике расчета может вносить существенную ошибку в расчет нейтронно-физических характеристик отработавшего ядерного топлива и в результаты, полученные по инженерным расчетным программам, которые используются при проектировании или эксплуатации АЭС. Также точность расчета энерговыделения играет немаловажную роль при предсказании спектра реакторных антинейтрино [1,2].

В данной работе обсуждается разработанная авторами методика расчета вклада захватной составляющей в общее энерговыделение ядерных реакторов, а также результаты проведенных с ее помощью расчетов. Методика базируется на использовании прецизионных нейтронно-физических кодов (MCNP, MCU, SCALE и др.), применяемых для расчета скоростей ядерных реакций в реакторе, которые затем используются в расчете различных составляющих энерговыделения. Прецизионные нейтронно-физические коды позволяют проводить высокоточные расчеты и получать хорошо приближенные к эксперименту результаты. Это достигается как за счет специфики метода Монте-Карло, так и благодаря воз-

возможностям данных кодов в детализации физических моделей и рассчитываемых функционалов.

С целью тестирования методики были разработаны модели эквивалентной ячейки реактора ВВЭР-1000 с отражением нейтронов на внешних границах для кодов MCNP и MCU. Как и в реальном реакторе эффективный коэффициент размножения нейтронов выводился на единицу добавлением в замедлитель борной кислоты. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов энерговыделения для модели эквивалентной ячейки ВВЭР-1000 с использованием программ MCNP и MCU

Рассчитываемый функционал	MCNP	MCU	Разногласие $\frac{MCU - MCNP}{MCU}$
$K_{эф. хол.} (T_{топлива}=300K)$	1.0024	1.0029	0.05%
$E_{захв. хол.}, МэВ$	5.94	5.92	-0.40%
$E_{эфф. хол.}, МэВ$	199.62	199.59	0.28%
Доля $E_{захв. хол.}$ в $E_{эфф. хол.}$	2.98%	2.97%	-0.39%
$K_{эф. гор.} (T_{топлива}=1200K)$	1.0024	0.9952	-0.72%
$E_{захв. гор.}, МэВ$	6.37	6.38	-0.02%
$E_{эфф. гор.}, МэВ$	200.09	200.11	0.01%
Доля $E_{захв. гор.}$ в $E_{эфф. гор.}$	3.18%	3.19%	0.27%

С целью определения доли захватной составляющей на модели более близкой к реальной установке была разработана модель ТВС ВВЭР-1000 (тип 13ZS) в холодном состоянии для кода MCNP. Также для проверки влияния выгорающих поглотителей на величину захватной составляющей была разработана модель ТВС ВВЭР-1000 с гадолинием (тип 30ZSV), также в холодном состоянии. Доля захватной составляющей для ТВС без гадолиния составляет 3,2% от полного энерговыделения, а для ТВС с гадолинием – 3,7%. Полученные результаты свидетельствуют о росте общего энерговыделения при использовании ТВС с гадолинием в качестве выгорающего поглотителя на 0,5%. Расчеты, проведенные по программам MCNP и MCU, показывают хорошее согласие результатов как в горячем, так и холодном состоянии.

Список литературы

1. Крамеров А.Я., Шевелев Я.В., Инженерные расчеты ядерных реакторов. // М: «Энергоатомиздат», 1984. -736с.
2. Kopeikin V.I., Mikaelyan L.A., Sinev V.V. Reactor as a source of antineutrinos: Thermal fission energy. // *Physics of Atomic Nuclei*. 2004. Т. 67. № 10. С. 1892-1899.

С.Н. НИКИТИН, Д.П. ШОРНИКОВ, Б.А. ТАРАСОВ
Научный руководитель – В.Г. БАРАНОВ, к.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА МАТРИЦЫ ДИСПЕРСНОЙ ТОПЛИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Данная работа посвящена разработке материала матрицы дисперсной топливной композиции на основе AlBe сплавов. В работе показано преимущество разработанного материала перед своими аналогами.

В соответствии с программой нераспространения ядерного оружия в исследовательских реакторах необходимо использовать топливо с обогащением не более 20%²³⁵U, т.е. низко обогащенное урановое топливо. Для минимизации отрицательных последствий перехода на низкообогащенное топливо предложено использовать в качестве топливных частиц высокоплотные композиции, диспергированные в алюминиевой матрице.

Основным фактором, сдерживающим использование указанной композиции, является взаимодействие между УМо гранулами и алюминиевой матрицей при высоких уровнях выгорания. Взаимодействие приводит к дополнительному распуханию твэлов, уменьшению теплопроводности матрицы и повышению температуры в центре твэла, образованию интерметаллических соединений, сквозной пористости и выходу твэла из строя. Из-за взаимодействия с алюминием УМо топливо не нашло широкого применения в высокопоточных реакторах, что требует поиска новых альтернативных решений в этом направлении. С целью уменьшения взаимодействия уран-молибденового металлического топлива с алюминиевой матрицей применяется легирование матрицы различными элементами, в том числе кремнием, однако кремний затрудняет последующую радиохимическую переработку топлива, а так же приводит к ухудшению механических и теплофизических свойств матрицы.

Вне реакторные исследования [1-5] взаимодействия в плоской геометрии показали, что введение бериллия в алюминий в количестве от 2 до 8 мас.% способствует снижению физико-химического взаимодействия с уран-молибденовыми сплавами (Рис.1).

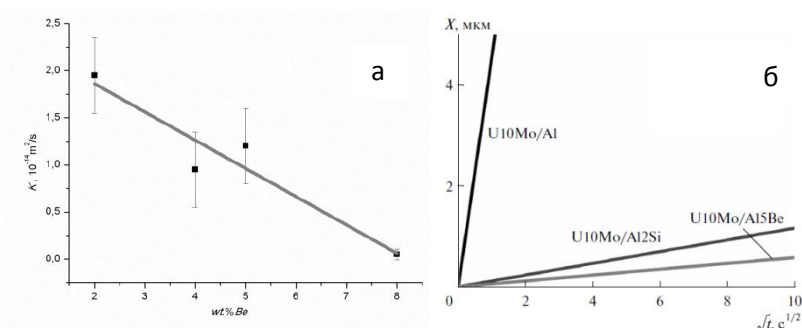


Рис. 1. (а) Влияние легирования Be на кинетику взаимодействия; (б) сравнение скоростей взаимодействия в различных алюминиевых сплавах при 550°C [4,5]

Также предварительные исследования теплофизических и механических свойств алюминий-бериллиевых сплавов показали, что теплопроводность сплавов системы AlBe на 20-30% выше, чем у соответствующих сплавов AlSi. У сплавов AlBe в деформированном состоянии предел прочности на 10-15% больше, чем у соответствующих сплавов системы AlSi. При этом пластичность AlBe сплавов выше, что важно для технологии изготовления дисперсных твэлов.

Список литературы

1. С.Н. Никитин, Б.А. Тарасов, Д.П. Шорников, М.А. Бурлакова, В.Г. Баранов, Вестник науки ТГУ, 2013, том 3. С.83-86
2. С.Н. Никитин, Б.А. Тарасов, Д.П. Шорников, М.А. Бурлакова, В.Г. Баранов, Вестник НИЯУ "МИФИ", 2014, том 3, № 4, с. 437-440.
3. С.Н. Никитин, Б.А. Тарасов, Д.П. Шорников, В.Г. Баранов, Цветные металлы 2015 № 8 с. 66-70.
4. С. Н. Никитин, Б. А. Тарасов, Д. П. Шорников, М. А. Бурлакова, В. Г. Баранов, Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, № 7-8, с. 600-605
5. S.N. Nikitin, B.A. Tarasov, D.P. Shornikov, Physics Procedia 72 (2015) 370 – 373

О.А. НАГОВИЦЫНА

Научный руководитель – В.В. СЕРГИЕВСКИЙ, д.хим.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СОЛЬВАТАЦИЯ БРОМИДА ЛИТИЯ В МЕТАНОЛЕ

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал по осмотическим коэффициентам растворов различных солей лития в спиртах и некоторых других органических растворителях. Ранее обоснованные уравнения кластерной модели растворов устанавливают связь осмотических коэффициентов с концентрацией солей. Уравнения учитывают вклад в неидеальность сольватации, ионной и молекулярной ассоциации. Они содержат 2-3 подгоночных параметра. Установлено, что сольватация и диссоциация определяет неидеальность растворов бромида лития в метиловом спирте. При этом число сольватации соли не зависит от температуры.

Для понимания закономерностей разделения изотопов лития необходимо знание состояния его солей в различных средах. Результатом взаимодействия ионов электролита с молекулами органического растворителя является образование спектра стехиометрических сольватов со стехиометрическими числами сольватации $i = 0, 1, 2, \dots$. Показано, что в рамках кластерной модели для описания распределения сольватов по стехиометрическим числам сольватации вместо ряда констант термодинамического равновесия удобно использовать среднеионное число сольватации электролита h . Зависимость h от мольной доли растворителя x_s нелинейна

$$h = h_1 x_s^{r_1}.$$

Здесь h_1 и D_1 – математическое ожидание и дисперсия распределения сольватов ионов при мольной доле органического растворителя $x_s = 1$, $r_1 = D_1/h_1$.

Итоговое уравнение, описывающее зависимости осмотического коэффициента от концентрации электролита, имеет вид [1]

$$\varphi = -\frac{A_D |z_1 z_2| \sqrt{I}}{(B_D \sqrt{I})^3} \left(\frac{(1 + B_D \sqrt{I})^2 - 2 \ln(1 + B_D \sqrt{I}) - 1}{1 + B_D \sqrt{I}} \right) - \frac{n_s^0}{\nu m} \left(-\frac{h_1 x_s^{r_1 - 1} x^2}{1 - h_1 x_s^{r_1} x} + \ln(x_s) \right).$$

в котором I – ионная сила раствора, z_1, z_2 – заряды ионов, ν – число ионов, на которое диссоциирует электролит, n_s^0 – количество вещества в одном килограмме растворителя. В этом уравнении помимо параметров теории

Дебая-Хюккеля A_D и B_D содержатся эмпирические параметры h_1 и r_1 , где h_1 – среднеионное число сольватации электролита при равновесной активности воды равной 1.

Имеются подробные экспериментальные данные по осмотическим коэффициентам растворов бромида лития в метиловом спирте, полученные при изменении концентрации соли от разбавленных растворов до 6,85 моль/кг спирта [2]. Результаты описания концентрационных зависимостей ϕ и расчета $\gamma_{\pm}$ по этим данным приведены ниже.

T, K	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15	323.15	328.15
B_D	0.37	0.42	0.37	0.38	0.46	0.45	0.41
h_1	3.94	3.84	3.91	3.92	3.80	3.83	3.89
r_1	1.31	1.25	1.31	1.33	1.27	1.30	1.35
σ_{ϕ}	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
$\sigma_{\gamma_{\pm}}$	0.67	0.45	0.69	0.28	0.18	0.25	0.17

Установлено, что основной вклад в неидеальность изученных растворов вносит сольватация соли и ее электролитическая диссоциация. Судя по стандартным отклонениям уравнение модели адекватно описывает экспериментальные данные. Число сольватации соли практически не зависит от температуры.

Анализ данных по осмотическим коэффициентам различных солей щелочных металлов в неводных растворителях показывает, что числа сольватации солей и их состояние в отношении электролитической диссоциации во многом определяется природой аниона.

Благодарю доцента кафедры общей химии НИЯУ МИФИ А.М. Рудакова за ценное обсуждение результатов работы.

Список литературы

1. Sergievskii V.V., Rudakov A.M., Ananyeva E.A., Glagoleva M.A. Nonlinear contribution of hydrophobic hydration in osmotic coefficients of electrolyte solutions // Physics Procedia. 2015. V. 72. P. 73-78.
2. Nasirzadeh K., Papaiconomou N., Neueder R., Kunz W., Vapor pressures, osmotic and activity coefficients of electrolytes in protic solvents at different temperatures. 1. Lithium bromide in methanol // Journal of Solution Chemistry, 2004, V. 33, p. 227 – 245

Е.В. БОГДАНОВА

Научный руководитель – С.С. ГОРОДКОВ, к.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

ПОДАВЛЕНИЕ КСЕНОНОВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ В СТОХАСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ БОЛЬШИХ РЕАКТОРОВ

Одной из проблем нейтронно-физических расчетов больших реакторов является неустойчивость результатов, вызванная пространственными колебаниями ^{135}Xe . Особенно неприятна она в расчетах по методу Монте-Карло. В данной работе исследуется возможность предотвращения таких колебаний путем использования гибридного стохастического/детерминистского алгоритма.

Каждый расчет энерговыделения в большом реакторе по методу Монте-Карло, самосогласованный по ксенону, температуре топлива и плотности теплоносителя предполагает определенное количество итерационных шагов, требует нескольких суток времени и использует сотни процессоров. Неизбежная статистическая погрешность энерговыделения, получаемого на каждом шаге, рассогласовывает результаты и провоцирует неустойчивость расчета. Для предотвращения этих колебаний необходимо получить самосогласованное равновесное распределение концентрации ^{135}Xe по активной зоне реактора и при этом уменьшить время счета. В связи с этим предлагается выполнить расчет большого реактора по программе MCU с некоторым начальным распределением ^{135}Xe . Затем рассчитать равновесное распределение ^{135}Xe по детерминистской сеточной программе НЕМЗ [1], используя в качестве ячейечных характеристик полученные из MCU средние сечения и коэффициенты диффузии. После чего снова вернуться к расчету по Монте-Карло уже с новым равновесным значением концентрации ^{135}Xe . Расчет распределения по детерминистской программе не требует огромных вычислительных затрат, и при этом полученный результат достаточно близок к точному распределению, подсчитанному чисто по программе Монте-Карло. Тем самым мы получаем самосогласованное равновесное распределение концентрации ^{135}Xe и сокращаем количество итерационных шагов при расчете по программе MCU.

Была рассмотрена бесконечная однородная решетка гексагональных ячеек, охлаждаемых водой [2]. Обогащение топлива UO_2 составляет 2,4 %. Температура топлива и воды – 550 К. Высота рассматриваемой сборки с

условием отражения на верхней/нижней границах равна 350 см. Тепловая мощность одной ячейки составляет 59 кВт. При исследовании также рассматривались сборки других высот – 250 и 450 см [3]. Как и ожидалось, нестабильность уменьшается с уменьшением высоты сборки и спустя большое количество шагов может совсем успокоиться. Однако, это справедливо только для реакторов, высота которых заметно меньше высоты реактора ВВЭР.

При получении равновесного распределения ^{135}Xe с помощью детерминистской сеточной программы НЕМ3 была установлена необходимость использования в расчете нескольких энергетических групп, так как ^{135}Xe поглощается преимущественно тепловыми нейтронами. При использовании 4-х группового приближения оказалось, что среднеквадратичное отклонение распределения мощности от равновесного значения составляет 2,2 %, тогда как на втором шаге по MCU оно составляет 4,5 %. Это даёт основание полагать, что достаточно всего лишь начального расчета по MCU для получения ячеечных характеристик и дальнейшего их использования в детерминистской программе с целью получения равновесного распределения концентрации ^{135}Xe .

Таким образом, нам удалось показать возможность использования гибридного стохастического/детерминистского алгоритма для предотвращения ксеноновой нестабильности в расчетах больших реакторов по программе MCU.

Список литературы

1. Городков С. С. Аннотация программы "НЕМ-3"// Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов: научно-технический сборник. – М., 1984. – Т. 8(45). – С. 40-42.
2. Dufek J., Kotlyar D., Shwageraus E., Leppanen J. Numerical stability of the predictor – corrector method in Monte Carlo burnup calculations of critical reactors. Annals of Nuclear Energy, 2013, No. 56, 34 – 38.
3. Bogdanova E. V., Gorodkov S. S. Xenon instability study of large core Monte Carlo calculations. Proc. of the 25th Symposium of AER, Balatongyörök, Hungary, 13 – 16 October 2015.

А.О. ДЕНИСЕНКО, И.Д. ГАМЦЕМЛИДЗЕ, М.О. ДЕНИСОВА

Научный руководитель – С.П. НИКОНОВ, к.т.н., с.н.с.

Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС), Москва

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С РЕЖИМАМИ ОТКЛЮЧЕНИЯ И ПОДКЛЮЧЕНИЯ ГЦН НА БЛОКЕ № 4 КАЛИНИНСКОЙ АЭС

Данная работа является очередным этапом валидации расчетной схемы для моделирования поведения реакторных установок ВВЭР-1000 системным кодом ATHLET [1-3]. Эта схема была использована при анализе стандартных проблем для реакторов ВВЭР-1000 (проект В-320) [4-5].

В данной работе представлены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных для реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000 (4-ый блок Калининской АЭС), полученных на подэтапе "Холодно-горячей обкатки (ХГО)" во время серии исследований, связанных с изучением поведения РУ при последовательном отключении и подключении главных циркуляционных насосов (ГЦН): с исходного состояния при четырех работающих ГЦН до состояния РУ с отключенными ГЦН и последующим последовательным включением двух ГЦН. Проведен статистический анализ экспериментальных (полученных системой СВРК) и расчетных параметров, характеризующих гидродинамику первого контура: распределение расходов по петлям, давление и перепады давления на основных элементах первого контура (в частности, перепад на реакторе и на ГЦН) в тех точках, которые контролируются системой внутриреакторного контроля (СВРК). Результаты анализа показали, что отклонения экспериментальных данных от расчетных близки к закону нормального распределения. Кроме того, сделано предположение, что датчики СВРК, используемые для измерения перепада давления на реакторе (область входных и выходных патрубков) расположены ближе к петле № 2.

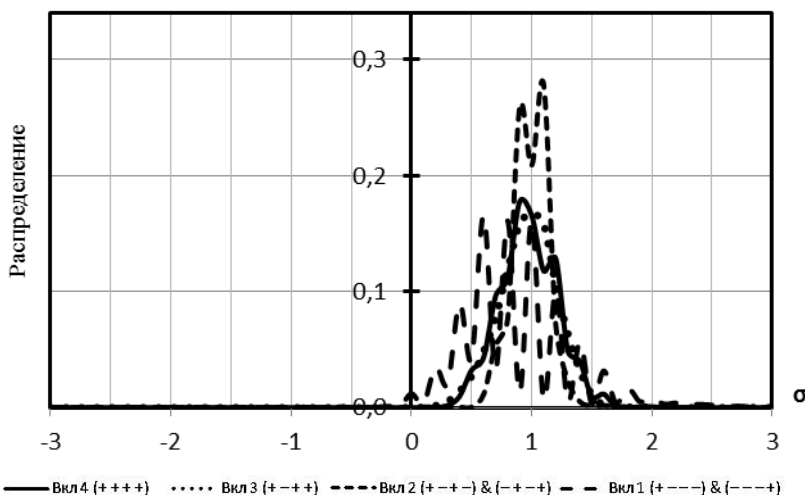


Рис. 1. Распределение отклонений (в зависимости от режима работы ГЦН) экспериментальных данных по перепадам давления на реакторе от расчетных вблизи петли №2

Список литературы

1. G. Lerchl, H. Austregesilo, ATHLET Mod2.2 Cycle B, User's Manual, GRS 2011.
2. I. D. Gamtsemlidze, A. O. Denisenko, M.O. Denisova, S.P. Nikonov, R.A. Sizov, Validation of VVER-1000 reactor computational model for ATHLET program code based on experimental data of Kalinin NPP unit 4, 25th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Balatongyörök, Hungary, October 13-16, 2015.
3. М.О. Денисова, А.О. Денисенко, И.Д. Гамцемлидзе, С.П. Никонов, Р.А. Сизов, Сравнительный анализ режимов отключения и подключения ГЦН на энергоблоке №4 Калининской АЭС с помощью кода ATHLET и систем СВРК и УЗР, Межотраслевой научно-технический семинар «Расчетные и экспериментальные исследования динамики ядерных энергетических установок на этапах жизненного цикла», ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор, 20 – 22 октября 2015 г.
4. Ivanov, B., Ivanov, K., Groudev, P., Pavlova, M. and Hadjiev, V., VVER-1000 Coolant Transient Benchmark Ivanov, B., Ivanov, K., Groudev, P., Pavlova, M. and Hadjiev, V., VVER-1000 Coolant Transient Benchmark Volume I: Specifications of the MCP Switching on Problem, Revision 1, OECD NEA/NSC/DOC (2003).
5. Kolev, N.P., Royer, E., Bieder, U., Aniel, S., Popov, D. and Topalov, Ts. VVER-1000 Coolant Transient Benchmark Kolev, N.P., Royer, E., Bieder, U., Aniel, S., Popov, D. and Topalov, Ts. VVER-1000 Coolant Transient Benchmark Volume II: Specifications of the RPV Coolant Mixing Problem, OECD NEA/NSC/DOC (2004)

С.Н. ТИХОНОВ

Научные руководители – И.М. КУРЧАТОВ, к.ф.-м.н., доцент

Н.И. ЛАГУНЦОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

ОАО «Аквасервис», Москва

СОВОКУПНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛЮМОКРЕМНИЕВОГО КОАГУЛЯНТА

В настоящей работе в качестве реагента используется алюмокремниевый гибридный реагент на основе АКФК, содержащий сульфат алюминия и активную кремниевую кислоту. Известно, что эффективность сульфата алюминия в качестве коагулянта ограничено коагулирующей способностью гидроокиси алюминия. Основная задача реагента – это дестабилизация дисперсной системы [1]. Коагулирующий эффект активной кремниевой кислоты основан на взаимной коагуляции разноименно заряженных частиц, где молекулы кремниевой кислоты являются центрами коагуляции системы.

Динамика синергетического эффекта в алюмокремниевых реагентах изучена плохо. Тем не менее, предполагается, что при определенных условиях эти центры, в результате их дальнейшего взаимодействия, формируют ячейки. Далее структуры становятся более крупными из-за слипания этих звеньев. В результате процесса самоорганизации получаются сложные пространственные трехмерные структуры, у которых способность хлопьеобразования увеличена из-за способности адсорбировать загрязнители в полости между звеньев. Высокая эффективность алюмокремниевых реагентов обусловлена, с одной стороны, аддитивными свойствами компонентов композита, а с другой стороны, формированием мезопористых алюмокремниевых структур.

Процессы самоорганизации наблюдаются в растворе реагента сразу после его изготовления, образуются частицы, размер которых варьируется от 1 нм до 1000 нм. Распределение по размерам частиц зависит от внешних факторов, а также начальной концентрации раствора реагента и времени (рис. 1).

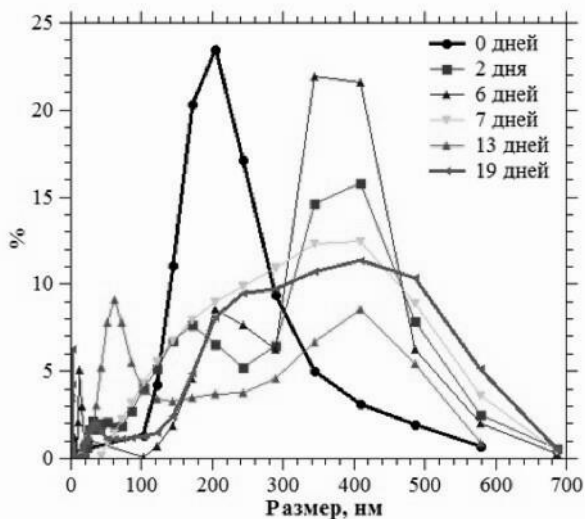


Рис. 1. Функция распределения по размерам для 1% раствора реагента от времени прошедшего со дня изготовления [2]

Таким образом, актуальной является задача исследовать процесс самоорганизации алюмокремниевых структур и формирование ансамблей наночастиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ по соглашению № 14.575.21.0086. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI157514X0086

Список литературы

1. Айлер Р. А 36 Химия кремнезема: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. Ч. 1., ил.
2. Теоретическое исследование поставленных перед ПНИ задач [Текст]: отчет о ПНИ (промежуточ.) /НИЯУ МИФИ; рук. Курчатов И. М. – М., 2015. – 181 с. – Исполн.: Курчатов И. М. и др. – № ГР 114141970016. – ИКРБС. № 215111350012.

А.Н. МАТЯТИНА

Научный руководитель – Н.П. КАЛАШНИКОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕХАНИЗМЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

На примерах фазовых переходов в металлической проволоке, связанных с действием электрического поля, и при взаимодействии металлических объектов с твердой преградой анализируются возможные механизмы дополнительного выделения энергии, приводящей к быстропотекающим физико-химическим процессам высвобождения большого количества энергии.

В многочисленных экспериментах [1-5] отмечались необычные эффекты при взрыве металлических проволок и при торможении металлических объектов (снарядов, изготовленных из свинца, висмута, урана и разных сплавов) в твердых мишенях.

Например, при взрыве молибденовой и вольфрамовой проволок энергия, необходимая для расплавления проволок заметно превышала затраченную энергию электропитания [3].

Взаимодействия металлических снарядов с преградой описаны в [4,5], где прецизионная калориметрия, проведенная исследователями МГТУ им. Баумана, показала, что количество тепла, выделившееся при попадании снаряда в мишень, может значительно превышать расчетную кинетическую энергию самого снаряда.

В данной работе была проведена оценка энергии, необходимой для полного испарения кристаллической структуры металла, которой оказалось недостаточно для полного разрушения металлического объекта, что наблюдается в упомянутых выше экспериментах.

Далее был предложен механизм выделения дополнительной энергии в процессе окисления металлического пара. Для ряда металлов были вычислены значения энергии, выделяющиеся при взрывном окислении атомарного металлического пара. Был сделан вывод, что при скоростях металлического объекта больше рассчитанного в работе порогового значения данный процесс внесет существенный вклад в дополнительное выделение энергии.

Кроме того, были проведены оценки скорости протекания химической реакции окисления продуктов испарения объектов после соударения, что подтвердило взрывной характер протекания реакции.

В [3] исследователями МГТУ им. Баумана были описаны эксперименты с молибденовой проволокой в воздушной атмосфере в условиях протекания через нее постоянного тока с напряжением холостого хода 38 В.

В некоторых работах [6,7,8] обсуждалась возможность изменения физических свойств (температура плавления, удельная теплота плавления) металлов при локальном нарушении электронейтральности. В настоящем докладе хотелось бы привлечь внимание к влиянию экзотермического окисления поверхности металла на дополнительное выделение теплоты.

Благодаря проведенным оценкам было установлено, что в результате упомянутого выше процесса возможно выделение энергии в 2-3 раза превышающей энергию, необходимую для расплавления металлической проволоки, а благодаря оценке скорости протекания этой реакции стал ясен ее взрывной характер.

Список литературы

1. Kleen W. Über den Durchgang ger Elektrizitat Durch Metallische Haarddrahte // Annalen der Physik (Leipzig). 1931. F.5. Bd. 11. Heft 5. S. 579-605.
2. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
3. Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Квантовая макроэлектродинамика. События макромира, объясняемые законами квантовой механики. Опыт и теория. М.: КРАСАНД, 2014. 776 с.
4. Марахтанов М.К., Велданов В.А., Максимов М.А., Тарасов М.А. Некоторые особенности взаимодействия металлического снаряда с металлической преградой // Изв. РАН. 2009. №1(59), С. 43-53.
5. Марахтанов М.К., Велданов В.А., Духопельников Д.В., Карнейчик А.С., Максимов М.А. Результаты взаимодействия металлических снарядов со стальной мишенью // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Вып. 3-4. №1, 2013. С. 25-34.
6. Erokhin K.M., Kalashnikov N.P., Nesterikhin Yu.E., Olchak A.S. Coulomb Explosion of Univalent Metals under the Condition of Partial Removal of Conduction Electrons // Doklady Physics. 2011. V.56. #2, P. 67-72.
7. Erokhin K.M., Kalashnikov N.P., Nesterikhin Yu. E., Olczak A.S. Binding Energy and the Size of Atomic Cells in Univalent Metals in the Model of Charged Balls // Doklady Physics. 2010. V. 55. #6. P. 253 – 256.
8. Духопельников Д.В., Калашников Н.П., Марахтанов А.М., Марахтанов М.К., Ольчак А.С. Кулоновский взрыв в тонких проволоках. // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Т. 1. № 4. С. 339-346.

А.Н. ЮСУПОВ

Научный руководитель – А.С. КУПРИЯНОВ, научный сотрудник
Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ И ^{89}Sr НА УСТАНОВКЕ QUANTULUS 1220

Была проведена аттестация растворов равновесного $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr . Описана методика определения эффективности регистрации радионуклидов. Так же, описаны способы приготовления точечных и объемных источников. Найдены эффективности регистрации равновесного $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr .

На практике понятие эффективности регистрации используется в узком смысле только энергетической функции вероятности регистрации данного вида излучения данным типом детектора, среднее значение которой определяется как отношение числа зарегистрированных частиц к числу частиц, попавших на входное окно детектора. Тогда выражение для эффективности регистрации примет вид:

$$\varepsilon = \frac{n}{A}, \quad (1)$$

где: n – скорость счёта импульсов от источника (имп/с), A – активность в источнике (Бк).

Для определения удельной активности растворов нам необходимо воспользоваться другим прибором с известными характеристиками и имеющим свидетельство об аттестации. В качестве такого прибора мы воспользуемся газопоточным счётчиком УДИС РБ-4.

Для измерения удельной активности и метрологической аттестации раствора изготовим по 5 точечных источников на металлической подложке для каждого радионуклида ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr). С помощью электронных весов, нанесём исходный раствор объемом 0,02 мл. Массы аликвоты раствора для каждого источника должны фиксироваться. Источники высушиваем и прокаливаем их в защитном боксе.

Относительная погрешность определения активности $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr в источнике не превышает 4% [1]. Погрешность определения массы аликвоты (0,5% для объёма 0,02 мл) считаем пренебрежимо малой. Таким образом, погрешность определения удельной активности по формуле (2) будет не выше 4%.

Далее изготовим объемные источники для установки Quantulus 1220. В три стандартных флакона объемом 20 см^3 нанесём 0,02 мл, 0,05 мл и 0,1 мл исходного раствора ^{89}Sr , получив примерные активности $1 \cdot 10^3$ Бк, $2,5 \cdot 10^3$ Бк и $5 \cdot 10^3$ Бк. Для определения эффективности регистрации ^{89}Sr в сцинтилляторе, внесём в эти флаконы сцинтилляционный коктейль. В следующие три флакона с аналогичным объёмом раствора ^{89}Sr внесём 10 мл дистиллированной воды, для определения эффективности регистрации ^{89}Sr по черенковскому излучению. Аналогичную операцию проведём для раствора $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Активность радионуклидов в объёмных источниках найдём по формуле 2:

$$A = a \cdot m, \quad (2)$$

Измерение скорости счёта от объёмных источников проведём на установке Quantulus 1220, затем определим эффективность регистрации для $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr по формуле 1.

Для всех 12 источников была посчитана эффективность регистрации по формуле 1 и найдено среднее значение. В таблице 4 представлены результаты вычисления эффективности регистрации радионуклидов $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr в сцинтилляторе и дистиллированной воде.

Из Таблицы 4 видно, что эффективность регистрации высокоэнергетичных бета-излучателей ^{89}Sr и равновесной пары $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ жидкосцинтилляционным методом близка к 100%. А по черенковскому излучению эти значения существенно ниже, как и следовало ожидать. Значение эффективности регистрации пары $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ниже аналогичного значения для ^{89}Sr , так как в расчёте участвует суммарная активность ^{90}Sr и ^{90}Y , а вклад в скорость счёта даёт в основном только ^{90}Y .

Таблица 4. Эффективности регистрации растворов $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr в сцинтилляторе и дистиллированной воде

	^{89}Sr		$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	
	дистиллированная вода	сцинтиллятор	дистиллированная вода	сцинтиллятор
ε , %	48 ± 3	97 ± 5	36 ± 2	99 ± 5

Список литературы

1. Методика измерений. Определение активности α - и β -излучающих радионуклидов с помощью жидкосцинтилляционный счетчик. – Введ. 30.09.14. – Димитровград: АО ГНЦ НИИАР, 2014. – 11 с

ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ЯДЕРНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

Д.Е. КАЛЫКОВА

Научный руководитель – И.А. БУБЛИКОВА, к.т.н., доцент
Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ РОСТОВСКОЙ АЭС

В работе выполнен анализ динамики содержания железа общего и ионов меди в воде водоема-охладителя Ростовской АЭС и Цимлянского водохранилища, разделенных фильтрующей плотиной, за период 2002-2014 гг. Исследование трендов рассматриваемых показателей для воды сбросного и подводящего канала Ростовской АЭС позволило определить значимость влияния АЭС на сложившиеся тенденции динамики концентрации тяжелых металлов.

В системе охлаждения оборудования атомных станций часто используются водоемы-охладители, гидрохимические показатели которых могут меняться под воздействием АЭС. В качестве водоема-охладителя (ВО) Ростовской АЭС (РоАЭС) используется мелководная часть Цимлянского водохранилища, отделенная от него фильтрующей плотиной.[1]

Исследование динамики содержания тяжелых металлов в водоеме-охладителе, который тесно связан с Цимлянским водохранилищем, является актуальной, поскольку Цимлянское водохранилище (далее ЦВ) является важным хозяйственным объектом для населения и экономики в целом, так как является источником питьевого, сельскохозяйственного и промышленного водоснабжения.

В работе были использованы результаты контроля гидрохимических показателей вод, который осуществляется отделом охраны окружающей среды РоАЭС, за период 2002-2014 гг. При этом определяются показатели двух металлов, которые могут быть отнесены к категории тяжелых: железа и меди. Для оценки потенциального загрязнения воды ЦВ водой, фильтрующейся через плотину из ВО АЭС, был выполнен сравнительный анализ динамики концентраций рассматриваемых металлов в точках контроля №3 и 7, расположенных напротив друг друга через плотину в ВО и ЦВ.

Для оценки вклада атомной станции в концентрацию железа общего и ионов меди в воде ВО был проведен сравнительный анализ данных по точке № 16, характеризующей качество воды на выходе из сбросного ка-

нала, и № 17, расположенной в подводящем канале.[2]

В результате получены следующие основные результаты:

1. Концентрации железа общего в воде ВО РоАЭС и ЦВ одинаковы, поэтому с фильтрующей водой в ЦВ из ВО дополнительное количество этого ингредиента в водохранилище не поступает.

2. Не наблюдается постоянного превышения содержания железа общего в водах отводящего канала над аналогичным показателем воды подводящего канала. Можно предположить, что РоАЭС не является постоянным источником поступления дополнительного количества железа общего в водоем-охладитель.

3. Концентрация ионов меди в воде ЦВ меньше, чем в воде ВО, с тенденцией к снижению с уравниванием тренда $y = -0,0002x + 0,0039$ с коэффициентом детерминации 0,7483.

Для воды ВО отмечается рост показателя, с постоянным превышением ПДК в течение всего анализируемого периода с 2002 по 2014 гг. с линейной аппроксимацией: $y = 0,0006x + 0,0015$ и коэффициентом детерминации 0,8863.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в период с 2002 по 2014 гг. с фильтрующей водой из ВО в ЦВ поступали ионы меди.

4. Показано превышение концентрации ионов меди в воде, поступающей от АЭС, соответствующего показателя воды в подводящем канале атомной станции. Таким образом, причинами загрязнения воды ВО ионами меди могут являться охлаждающие воды, поступающие от технологического оборудования РоАЭС (в среднем до 545,69 кг в год). Это согласуется со средним повышением концентрации ионов меди в воде ВО в рассматриваемый период времени.

Выполненная работа по исследованию концентрации тяжелых металлов подтвердила необходимость замены на Ростовской АЭС медесодержащих труб на трубную часть из титанового сплава, завершившейся в 2015 г. по программе модернизации турбинного оборудования. Это позволило прекратить негативное воздействие экологически опасным загрязнителем на воду водоема-охладителя и Цимлянского водохранилища.[3]

Список литературы

1. Водный баланс водоема-охладителя. Ростовская АЭС блоки 1, 2. Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская Атомная Станция», Волгодонск, 2012. – 19 с.

2. РоАЭС. Отчеты о качестве сточных, условно-чистых и поверхностных вод Ростовской АЭС с 2002 по 2014 гг.

3. ОАО "Концерн Росэнергоатом" [Электронный ресурс] Ростовская АЭС: на энергоблоке №1 завершена замена модулей конденсатора турбины – Режим доступа: <http://www.rosenergoatom.ru/>

М.А. БАРАНОВА

Научные руководители – А.В. БОЙКО, начальник лаборатории;

В.П. КИРЕЕВ, инженер РНТ

В.Г. КОВАЛЕНКО, к.ф.-м.н.

*Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения,
Москва*

УСТРОЙСТВО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

Представлены результаты испытаний детектирующего устройства на основе алмазного детектора в двух режимах работы: импульсный (чувствительный диапазон измерения) и токовый (грубый диапазон измерения). Показано, что линейность измерительной характеристики детектора сохраняется в импульсном режиме в диапазоне от 10^{-3} до 0,4 Гр/ч и в токовом режиме от 10^{-1} до $2 \cdot 10^4$ Гр/ч. На основе полученных результатов сделан вывод о возможности создания широкодиапазонного детектирующего устройства на основе алмазного детектора.

Важнейшими задачами радиационного контроля на АЭС являются раннее обнаружение радиационных аварий, оперативный контроль их развития и процесса локализации, восстановление прошедших событий и оценка последствий аварии [1]. Традиционные материалы, применяемые для изготовления детекторов, уязвимы к большим дозам радиации и высоким температурам. Перспективными являются детекторы на основе кристалла алмаза, которые имеют высокий радиационный ресурс и сохраняют работоспособность при критических температурах [2].

По принципу действия алмазный детектор представляет собой твердотельную ионизационную камеру. Проходя через кристалл алмаза, гамма-излучение вызывает в нём ионизацию. Образующиеся в результате свободные носители заряда движутся под влиянием электрического поля к соответствующим электродам. Как и обычная ионизационная камера, алмазный детектор имеет два режима работы: импульсный и токовый.

Испытания алмазного детектора в токовом режиме работы показали, что линейность измерительной характеристики сохраняется в диапазоне мощностей доз от 10^{-1} до $2 \cdot 10^4$ Гр/ч (рис. 1). Линейная аппроксимация позволяет сделать вывод о возможности измерения мощности дозы гамма-излучения до значений 10^5 Гр/ч.

Диапазон работы детектора в токовом режиме не позволяет оценить момент начала аварии. Была проверена линейность счетной характеристики детектора в импульсном режиме работы в диапазоне мощностей от 10^{-3} Гр/ч до 0,4 Гр/ч. Из полученных данных видно, что в заданном диапазоне мощностей доз линейность не изменяется (рис. 2). Увеличением

времени экспозиции можно значительно расширить диапазон измерения (до 10^{-4} Гр/ч).

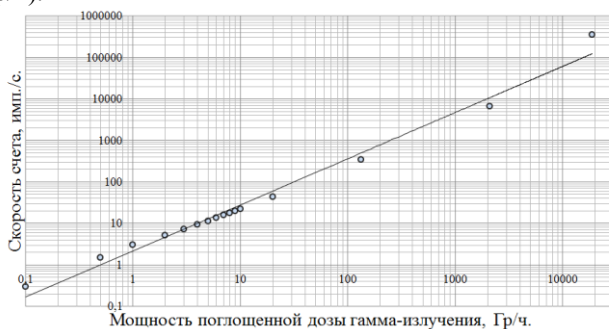


Рисунок 1 – Зависимость скорости счета детектора от полученной мощности дозы в токовом режиме

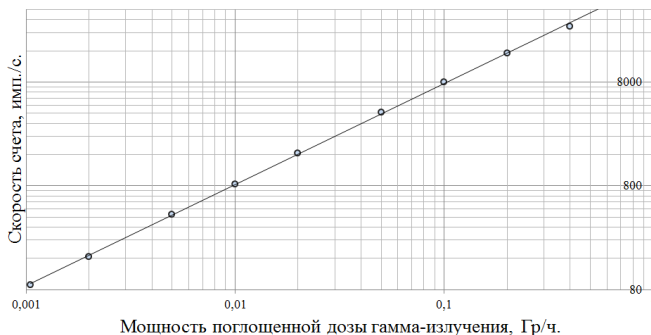


Рисунок 2 – График зависимости скорости счета детектора от полученной мощности дозы в импульсном режиме

Из полученных данных видно, что зависимость усреднённой скорости счёта от мощности дозы фотонного излучения сохраняет линейный характер в диапазоне от 10^{-4} до 10^5 Гр/ч. Нелинейность измерительной характеристики не превышает 10 %. Полученные результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности создания на основе алмазных детекторов широкодиапазонных устройств детектирования мощности поглощенной дозы фотонного излучения.

Список литературы

1. А.С.Книжник, С.Н.Федорченко, С.Б.Чебышов, АНРИ №2 (81), 2015, стр. 61-66
2. В.Н.Амосов, С.А. Мещанинов, Н.Б.Родионов, Р.Н.Родионов, Прикладная физика №3, 2012, стр. 79-85

И.А. ЧЕПАЙКИН

Научный руководитель – В.В. ХАРИТОНОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОБРАЩЕНИЕ С ЗРНИ, ИХ ЗАХОРОНЕНИЕ И УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЯДЕРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены ИИИ и предложен метод улучшения эффективности ядерного регулирования.

Переносные промышленные источники обычно малы, а их активность, хотя и варьируется в определенных пределах, низка по сравнению с некоторыми другими источниками. Их сложность невысока, однако эффективный контроль над ними затруднен по причине их свойств. Такие источники сложно отслеживать, если только они не были надлежащим образом зарегистрированы. Поэтому особо важно обеспечить безопасное обращение с ними и, в конечном итоге, их утилизацию. Возможность причинения ими ущерба весьма реальна, но ограничена, так как в результате инцидентов воздействию обычно подвергаются только один–два человека, хотя последствия для этих людей могут быть тяжелыми.

Проектирование и изготовление таких источников вышло на достаточно высокий уровень, а обеспечение качества и проверенная инженерно-техническая практика носят адекватный характер почти во всех случаях. Анализ опыта, полученного при использовании этого оборудования, и относительной важности указанных выше критериев четко показывает, что в качестве стратегии, более всего необходимой для безопасного обращения с такими источниками, следует опираться на хорошо развитую культуру безопасности. В этом случае культура безопасности проявляется в наличии компетентного, квалифицированного и мотивированного персонала и системы управления, обеспечивающей отслеживание источников.

Глубокоэшелонированная защита в качестве стратегии, здесь трудно применима, так как характеристики оборудования оставляют мало места для установления последовательных барьеров, при этом важно, чтобы те из них, которые уже имеются, использовались эффективно и грамотно.

Наибольшую радиационную опасность при обращении с радиоактивными материалами представляют закрытые радионуклидные (ЗРНИ). В

2003 году в рамках МАГАТЭ был принят «Кодекс по обеспечению сохранности и безопасности источников ионизирующего излучения».

В соответствии с Кодексом, странам рекомендовано ввести государственное регулирование обращения с радиоактивными источниками, которое обеспечит контроль со стороны национальных компетентных органов за всем жизненным циклом ЗРНИ от его изготовления до поставки потребителям и последующего захоронения после окончания срока эксплуатации. Отработанные ЗРНИ направляются на захоронение в специальные комбинаты ФГУП «РосРАО». В отдельных случаях ЗРНИ направляются на предприятия-изготовители с целью извлечения радиоактивных долгоживущих радионуклидов или стабильных изотопов, на основе которых в дальнейшем будут производиться реакторные и циклотронные радиоизотопы. Для улучшения эффективности ядерного регулирования нужно включить в стоимость ЗРНИ расходы на его захоронение, тем самым отпадет желание избавиться от источника нелегальным методом.



Рис

. 1. Жизненный цикл ЗРНИ

Список литературы

1. Безопасное обращение с источниками излучений: принципы и стратегия МАГАТЭ, Вена, 2014 год
2. Обеспечение радиационной безопасности при обращении с радиоактивными веществами. Презентация ГК Росатом, Москва, 2014
3. Методическое пособие по производству и сбыту изотопной продукции, ОАО «В/О «Изотоп», Москва.

И.С. КУЛИКОВ

Научные руководители – А.В. БОЙКО, начальник лаборатории

В.П. КИРЕЕВ, инженер РНТ

В.Г. КОВАЛЕНКО, к.ф.-м.н.

В.И. ПЕТРОВ, инженер РНТ

*Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения,
Москва*

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ БЛОК ДЕТЕКТИРОВАНИЯ НЕЙТРОНОВ

Работа посвящена широкодиапазонному блоку детектирования нейтронов ПДГН-06.

Рассмотрены различные методы решения задачи восстановления энергетического спектра и выбран наиболее оптимальный. Были выявлены проблемы этого метода и предложены пути решения. Были определены энергетические зависимости чувствительности и анизотропия чувствительности.

С помощью прибора ПДГН-06 экспериментально были определены плотности потока быстрых и промежуточных нейтронов для Pu-Be источника.

С 2000 г. в Нормах радиационной безопасности существенно ужесточили требования к ограничению облучения персонала [1], особенно это касается нейтронного облучения. Соблюдение этих требований невозможно без использования современных приборов контроля радиационной обстановки, методик выполнения измерений и обработки полученных результатов.

Для комплектования систем радиационного контроля с целью выполнения задачи группового контроля в поле нейтронного излучения разработан широкодиапазонный блок детектирования нейтронов. Нейтроны регистрируются пятью счётчиками тепловых нейтронов, размещенных так, чтобы их чувствительные объёмы находились на разной глубине в блоке замедлителя из полиэтилена.

Таким способом обеспечивается избирательная регистрация тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов с энергий до 15 МэВ.

Определена энергетическая зависимость чувствительности и анизотропия чувствительности [2] блока детектирования.

Рассмотрены методики восстановления нейтронных спектров по показаниям детекторов блока детектирования [3,4,5,6] и найден оптимальный метод решения задачи восстановления энергетического спектра.

Также экспериментально были определены плотности потока быстрых и промежуточных нейтронов для Pu-Be источника.

Список литературы

1. СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
2. А.В. Бойко, В.П. Киреев, В.Г. Коваленко, В.И. Петров, Г.Ф. Слученков. Определение основных измерительных параметров широкодиапазонных дозиметров-радиометров нейтронов и фотонов // Ядерные измерительно-информационные технологии, №3. М.: Технологии, 2002. С. 48-55.
3. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб: Политехника, 2001.-240 с.
4. Тараско М.З. Метод минимума направленного расхождения в задачах поиска распределений. Препринт ФЭИ №1446. Обниск, 1983.
5. Ко, То Тун Методика восстановления энергетического распределения потока нейтронов с помощью нейронных сетей по откликам, получаемым от многослойного детектора нейтронов: дисс... канд. физ.-мат. наук (01.04.01) / То Тун Ко; рук. Работы С.В. Колесников. – Москва: МИФИ, 2010. – 143 с.
6. Деденко Г.Л. Сравнение результатов восстановления спектров методом регуляризации А.Н. Тихонова и методом минимизации направленного расхождения // Научная сессия МИФИ-2002. Т.5 Медицинская физика и техника, биофизика. Математическое моделирование в геофизике. Охрана окружающей среды и рациональное природопользование. Теоретические проблемы физики, стр. 168-169
7. Кадилин В.В., Колесников С.В., Самосадный В.Т. Восстановление энергетической зависимости нейтронов по данным от многослойного детектора нейтронов // Научная сессия МИФИ-2001. Сборник научных трудов Т.5.-Москва : МИФИ , 2001.- 108 с.

М.Н. ГАЛАНОВА

Научный руководитель – И.А. БУБЛИКОВА, к.т.н., доцент
*Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ,
Ростовская область*

ДИНАМИКА ВЫБРОСОВ РОСТОВСКОЙ АЭС ИНЕРТНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ГАЗОВ И ЙОДА-131

Данная работа освещает проблемы обеспечения радиационной безопасности при выбросах инертных радиоактивных газов (ИРГ) и изотопов йода атомными станциями. Основное внимание уделено исследованию динамики выбросов ИРГ и ^{131}I на примере РоАЭС. Выполнен анализ динамики дозовой нагрузки на население г. Волгодонска газоаэрозольными выбросами АС.

На сегодняшний день атомная энергетика развивается быстрыми темпами, количество строящихся и установленных блоков АЭС увеличивается, а, следовательно, и возрастает влияние атомных станций на окружающую среду. На примере Ростовской АЭС (РоАЭС) были исследованы динамика выбросов ИРГ и изотопов йода.

РоАЭС – это единственная атомная станция, находящаяся так близко к г. Волгодонску с населением более 170 тысяч человек, а именно на расстоянии 13,5 км от него.

Изучались выбросы ИРГ и изотопов йода по официальным отчётам с атомной станции [1] и сопоставлялись с соответствующими нормативными значениями. Выбор именно этих радионуклидов связан с тем, что ИРГ составляют основную часть газообразных отходов АС, а изотопы йода легко усваиваются организмом человека вследствие его дефицита в щитовидной железе.

В результате анализа данных получили, что выбросы ИРГ РоАЭС за период 2002-2014гг. не только не превышают годовой допустимый выброс (ДВ) [2], т.е. находятся в пределах не опасного для населения значения, но при этом максимальный годовой выброс составляет не более 3% от ДВ.

Поскольку выбросы АЭС неравномерно распределяются в течении года, было выполнено сопоставление выбросов рассматриваемых радионуклидов за месяц с контрольным уровнем (КУ) [2]. Выбросы ИРГ после пуска второго блока возросли, но всё равно остались малы по сравнению с КУ и не превышали 7 % от него.

Аналогично были проанализированы выбросы ^{131}I РоАЭС за 2002-2014гг. С помощью Microsoft office Excel были построены тренды выбросов и аппроксимирующие прямые. Определено, что максимальные значения наблюдались в 2003 г., но при этом они составили только 2% и 20% от ДВ и КУ за месяц.

Также исследовалась дозовая нагрузка на население с учетом розы ветров. При этом только для села Дубовское аппроксимирующая зависимость с надежностью чуть более 50% отражает некоторый рост дозы, но этот населенный пункт находится не только за пределами зоны наблюдения (ЗН) радиусом тридцать километров, но и с подветренной стороны. Поэтому с. Дубовское используется в радиационном контроле территории размещения РоАЭС для сравнения с соответствующими показателями в ЗН.

Самая большая доза облучения выявлена для Санитарно-защитной зоны и не превышает 0,7 мЗв/год, что составляет всего 16 % от средней эффективной коллективной дозы облучения на жителя Ростовской области, где она составляет 4,38мЗв/год [3]. Средняя годовая эффективная доза на жителя г. Волгодонска за счёт всех источников ионизирующего излучения в 2013 г. составила 3,492мЗв/год [4].

Таким образом, выполненный анализ данных показал, что РоАЭС, даже находясь на таком близком расстоянии к г. Волгодонску, оказывает минимальное влияние выбросами ИРГ и ^{131}I на население и территорию с учетом современных представлений о безопасности радиационных факторов. Это имеет важное практическое значение при информировании населения региона размещения РоАЭС об уровне экологической безопасности.

Список литературы

1. ОАО «Концерн Росэнергоатом» - Отчёт о радиационной обстановке в районе расположения Ростовской АЭС за 2002-2013 гг. [Текст] – 20.03.2015.
2. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) [Электронный ресурс] Требования к защите персонала и населения– Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data1/42/42050/#i55816> – 20.03.2015.
3. «Радиационно-гигиенический паспорт территории субъектов РФ» – Радиационно-гигиенический паспорт территории Ростовской области за 2010г. [Текст] – 01.01.2011.
4. «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в г. Волгодонске Ростовской области в 2013 году» [Электронный ресурс] Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014. 191с. Режим доступа: http://rospotrebnadzor.ru/upload/iblock/3b8/gd_2013_dlya-sayta.pdf

Д.А. АКОБЯН

Научный руководитель – В.И. СЛОБОДЧУК, к.т.н., доцент
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, Калужская обл.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ОТРАБОТАННЫХ ТВС В БАСЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ РБМК-1000 ПРИ ЧАСТИЧНОЙ ПОТЕРЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ

Работа посвящена актуальной теме, связанной с обоснованием безопасности систем энергоблока с реактором РБМК-1000, а именно анализу температурного режима отработанных ТВС в бассейне выдержки при частичной потере охлаждающей воды и оголении части ОТВС. Рассмотрены варианты с оголением отработанных ТВС на 20%, 50% и 75%.

Расчеты проведены для варианта уплотненного хранения отработанных ТВС с учетом аварийной выгрузки части ТВС из реактора. В этом случае суммарная тепловая мощность отработанных ТВС в бассейне выдержки более чем в три раза превышает среднестатистическую мощность ОТВС. Расчеты проведены как для стационарного режима, так и для нестационарного режима разогрева ТВС и сред бассейна выдержки реактора типа РБМК-1000. Результаты расчетов показывают, что при частичной потере охлаждающей воды и оголении более 20% ТВС максимальная температура сборок достигает почти 2000°C , что существенно превышает допустимые значения (650°C). При этом во всех рассмотренных в работе случаях вода разогревается до температуры кипения.

Для оценки времени разогрева воды до температуры кипения проведен расчет режима нестационарного разогрева среды бассейна выдержки и ТВС. Это время оказалось равным примерно 7,5 часа. Что же касается разогрева оголенной части, отработанной ТВС в воздухе, то время разогрева до допустимой температуры значительно превышает время разогрева воды до температуры кипения. Видно, что у персонала имеется достаточный временной запас, чтобы предпринять меры по восстановлению циркуляции охлаждающей воды в бассейне выдержки.

Полученные результаты могут быть использованы при обосновании безопасности уплотненного хранения отработанных ТВС в бассейне выдержки реактора РБМК-1000.

Список литературы

1. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
2. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник. – 2-е изд., стер. М.: Изд-во МЭИ, 2006.

АВТОМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

А.А. ЧУМАКОВ, А.В. НОВОСЕЛЬЦЕВ, Д.Н. ФЕДОРЕНКО,
А.Н. ИВАНЫЧЕВА

Научный руководитель – П.Д. КРАВЧЕНКО, д.т.н., профессор
*Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ «МИФИ»,
Ростовская обл.*

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ТРАВЕРСЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАХВАТА ТРУБНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Предлагается исходная конструктивная схема траверсы для автоматического захвата трубных изделий. Объясняется методика проведения последовательного проектного обоснования отдельных элементов полной конструктивной схемы траверсы.

Предлагается применить конструктивную схему автоматического захвата трубы (АЗТ), как представлено на рис. 1, состоящего из траверсы 2, центрирующего устройства 3, наводящего ось траверсы в положение, параллельное оси трубы 5, фигурного крюка 4 АЗТ и направляющей 6 для центрирующего устройства 3, как показано на виде А. захватный элемент траверсы 2 для крюка 1 грузоподъемного крана представлен схематично. Стрелки обозначают возможное движение АЗТ только по вертикальной оси при захвате и освобождении объекта – трубы 5.

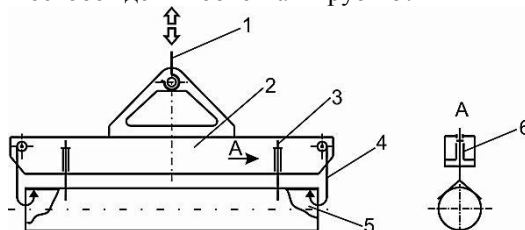


Рис. 1. Исходная конструктивная схема АЗТ: 1 – крюк подъемного устройства; 2 – траверса; 3 – центрирующее устройство; 4 – крюк автоматического захвата устройства; 5 – труба, 6 – направляющая для центрирующего устройства

Одним из главных условий обеспечения работоспособности АЗТ является создание обоснованной расчетной модели для принятой конструктивной схемы. Расчетная модель схематично представлена на рис. 2.

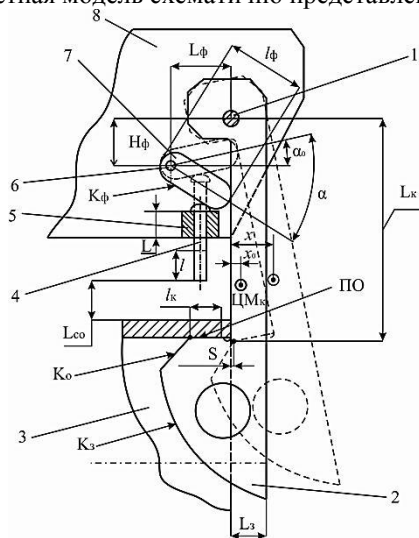


Рис. 2. Конструктивная схема расчётной модели АЗТ. 1 – ось крюка, 2 – крюк фасонный, 3 – труба, 4 – толкатель, 5 – втулка направляющая, 6 – ось фиксатора, 7 – фиксатор, 8 – траверса

Методика анализа конструктивных схем элементов приводит к синтезу полной конструктивной схемы траверсы. На основе приведенной методики можно с использованием эвристических приёмов создавать другие конструктивные схемы автоматических захватов. Предложенная конструкция позволяет производить операции перемещения труб и других длинномерных изделий в автоматическом режиме, без применения ручного труда, в частности, в особых условиях при демонтаже радиоактивного оборудования.

Список литературы

1. Вайнсон А.А., Андреев А.Ф. Специализированные крановые грузозахваты для штучных грузов. М. «Машиностроение», 1972, 200 с.
2. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: учеб. пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – Машиностроение, 1988. – 368 с.

Д.В. НИКОЛАЕВА

Научный руководитель – И.Б. СЕМЕНОВ, к.ф.-м.н.
ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», Москва

МАКЕТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТЕНДОМ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОРТ-ПЛАГОВ УСТАНОВКИ ИТЭР

В докладе представлены результаты применения методологии проектирования АСУ ТП подсистем установки ИТЭР. Опыт будет использован при сопровождении разработки диагностических подсистем, поставляемых Российской Федерацией для ИТЭР.

В рамках научно-исследовательской работы была спроектирована версия АСУ ТП стенда для тестирования порт-плагов перед установкой на термоядерный реактор. Фаза проектирования, рассмотренная в данной работе, открывает жизненный цикл подсистемы ИТЭР и состоит из трёх этапов: концептуального, предварительного и окончательного проектирования.

На первом этапе собраны входные данные, такие как философия работы системы, высокоуровневый функциональный анализ, чертежи подсистемы и диаграммы PFD и P&ID, состояния подсистемы, анализ рисков, функции защиты оборудования и безопасности персонала, описаны интерфейсы с другими системами. Итогом данного этапа являются системные требования к АСУ, которые включаются в «Соглашение о поставке».

На этапе предварительного проектирования АСУ выбрана физическая архитектура, конфигурация контроллеров и модулей, составлены списки сигналов и переменных, конфигурация стоек с оборудованием, описаны автоматы состояний. Результатом работы являются предварительная версия спецификаций системы.

На стадии окончательного проектирования детализированы спецификации предыдущего этапа. Одновременно со спецификацией системы проведено предварительное макетирование архитектуры АСУ.

Полученный опыт зафиксирован в виде плана-графика и практических рекомендаций для разработчиков АСУ ТП и менеджеров проекта.

Список литературы

1. PCDH (<http://www.iter.org/fr/org/team/chd/cid/codac/plantcontrolhandbook>)

А.А. ЧУМАКОВ, Д.Н. ФЕДОРЕНКО, А.Н. ИВАНЫЧЕВА
Научный руководитель – П.Д. КРАВЧЕНКО, д.т.н., профессор
Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ «МИФИ»

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАХВАТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предложена конструктивная схема автоматического захвата цилиндрических объектов для работы с трубами различной длины, расположенных горизонтально, вертикально или наклонно. С использованием эвристических приёмов исследована возможность применения захвата для работы при демонтаже радиоактивных реакторных установок.

Технологический процесс производства цилиндрических изделий в виде труб различных диаметров и толщин стенок, стержней сплошного сечения включает в себя процессы перемещения как при технологических переходах, так и при погрузке на транспортные средства, перегрузке и установке на технологическую позицию при доставке объекта потребителю.

Применяемые в настоящее время специализированные крановые грузозахваты для штучных грузов [1], в том числе для объектов цилиндрической формы, характеризуются использованием механизированных захватов с применением ручного труда.

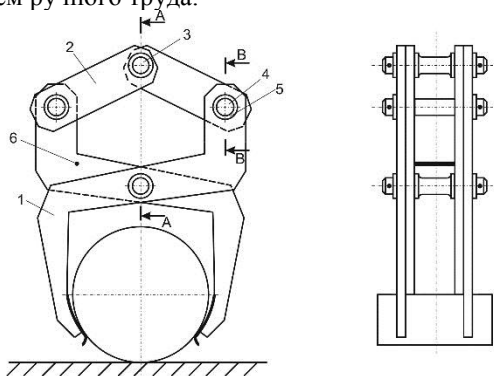


Рис. 1. Схема автоматического захвата цилиндрического объекта;
положение при захвате объекта:

1 – рычаг; 2 – серьга; 3 – ось грузовая; 4 – ось; 5 – шайба, 6 – упор

Представленная на рисунке 1 схема автоматического захвата цилиндрического объекта (АЗЦО) в виде трубы большого диаметра является упрощенным вариантом клещевого захвата [1], в котором с помощью эвристических приемов преобразования объекта [2] применен фигурный крюк, при захвате которым за верхнюю грузовую ось 3 происходит захват объекта, а при захвате за нижнюю грузовую ось происходит освобождение объекта. Расчетная модель представлена для определения геометрических и прочностных параметров. Конфигурации уточняются при расчетах на прочность и поиска приближенного к оптимальной форме АЗЦО при художественно-конструкторском обосновании проекта.

При проектировании и конструировании АЗЦО необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ основных параметров объектов перемещения: длина, диаметр и максимальный вес объекта.
2. Построение расчетной модели АЗЦО с определением прочностных параметров рычагов, осей, накладок.
3. Определение рациональной конфигурации крюка фигурного с условием его свободного вхождения в размер S и отклонение при контакте его контактной поверхности с поверхностями осей грузовых 3 при захвате и освобождении объекта.
4. Построение расчетной модели универсального АЗЦО для работы с объектами, продольная ось которых может располагаться горизонтально, вертикально или наклонно.
5. Учёт возможности работы АЗЦО в условиях демонтажа радиоактивного оборудования.

Список литературы

1. Вайнсон А.А., Андреев А.Ф. Специализированные крановые грузозахваты для штучных грузов. М. «Машиностроение», 1972, 200 с.
2. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: учеб. пособие для студентов вузов / А.И. Половинкин. – Машиностроение, 1988. – 368 с.

И.О. ЗУБКОВ

Научный руководитель – П.Д. КРАВЧЕНКО, д.т.н., профессор
*Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ «МИФИ»,
Ростовская обл.*

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ МАШИНОЙ МПК С ГИБКИМ ПОДВЕСОМ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрены системы управления перегрузочной машины МПК на модели в масштабе 1:5 при работе с цилиндрическими объектами и листами.

Система управления перегрузкой машины МПК разработана для условий эксплуатации при выполнении всех технологических операций перемещения и установки тепловыделяющих сборок (ТВС) в ядерном реакторе типа ВВЭР.

Представленная переработанная система предназначена для управления машиной МПК в случае нештатных ситуаций, например, при подъеме упавших ТВС, или при подъеме других элементов различной формы, оказавшихся в зоне перегрузки ТВС.

Схема управления предусматривает работу МПК с подвешенными автоматическими захватами для цилиндрических объектов, расположенных горизонтально, для листовых материалов, расположенных вертикально, для цилиндрических объектов, ось которых расположена вертикально.

На рис. 1 представлен главный вид автоматического захвата листа, расположенного вертикально.

Захват работает автоматически. Система управления обеспечивает условия захвата фигурным крюком при движении его только по вертикали. Представленная система управления захватами автоматическим универсальным для цилиндрических объектов при захвате за наружную поверхность горизонтального и захвата вертикального цилиндрического объекта и автоматического захвата листа, работающего вертикально.

Система управления проверена на модели в масштабе 1:5 машины перегрузочной МПК в лабораторных условиях. Запланировано проведение исследование системы управления на надежность.

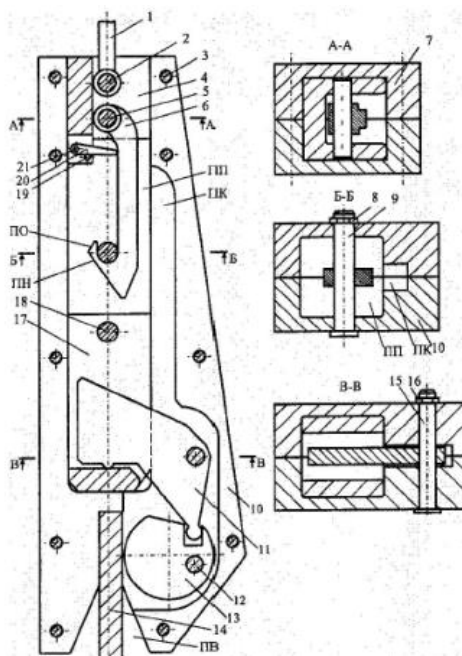


Рис. 1. Автоматический захват листа: 1 – стержень подвеса; 2 – ось подвеса; 3 – винт крепления; 4 – ползун подъема; 5 – ось крюка; 6 – крюк; 7 – щека левая; 8 – шайба; 9 – ось подъема захвата; 10 – щека правая; 11 – кулачок; 12 – ось кулачка; 13 – эксцентрик; 14 – лист; 15 – ось кулачка; 16 – шайба; 17 – ползун грузовой; 18 – ось ползуна грузового; 19 – ось ограничения упора; 20 – упор; 21 – ось упора; ПП – паз для ползуна; ПК – паз для крюка; ПВ – паз для вхождения листа; ПО – плоскость крюка отклоняющая; ПП – плоскость крюка направляющая.

Список литературы

1. Кравченко П.Д., Федоренко Д.Н. Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2015 г. – Донецк: МСМ, 2015. Т. 1. – 226 с.

А.С. ТАЛАЛАЙ

Научный руководитель – П.Д. КРАВЧЕНКО, д.т.н., профессор
*Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ «МИФИ»
Ростовская обл.*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ МАШИНОЙ С ГИБКИМ ПОДВЕСОМ ОБЪЕКТОВ ПЕРЕГРУЗКИ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ТИПА ВВЭР

Предложенные конструктивные схемы перегрузочных машин с канатным подвесом объектов перегрузки позволяют упростить структуру исполнительных органов, на порядок снизить вес машины, уменьшить количество деталей, что приводит к повышению надежности в целом.

В ВИТИ НИЯУ МИФИ на кафедре «Машиностроение и Прикладная Механика» успешно испытана в лабораторных условиях модель в масштабе 1:5 перегрузочной машины МПК с гибким подвесом объектов перегрузки и новой системой управления.

Проанализированы системы управления машинами, как существующих конструкций, так и предложенных. Требуется повысить скорость работы программного обеспечения, необходимого для работы системы, используя современные технологические решения. Выявлена в основном функциональная пригодность новой системы управления.

Для применения новой системы управления на натурном образце машины МПК поставлены задачи обеспечения надежности работы всех элементов системы с проверкой качества исполнения всех операций в автоматическом режиме.

В процессе перегрузки топлива важно учитывать и контролировать каждое движение перегрузочной машины МПК. В связи с этим было принято решение доработать систему управления перегрузочной машины, возникла задача реализовать функцию контроля над выполнением каждой технологической операцией (КВТО).

Поскольку функция контроля над выполнением каждой технологической операции находится на стадии тестирования, она выделена в отдельный блок, представленный на рис. 1.

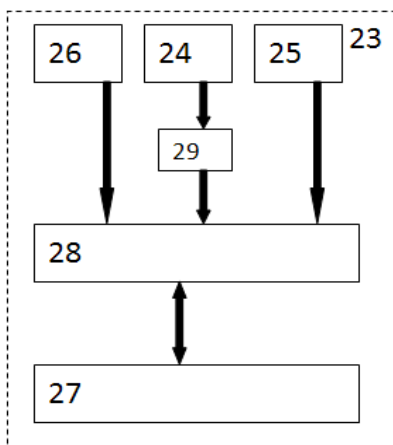


Рис. 1. Структурная схема блока контроля выполнения технологических операций: 23 – блок контроля технологических операций; 24 – контактный датчик; 25 – датчик наведения; 26 – датчик натяжения троса; 27 – микроконтроллер блока 23; 28 – ПЛИС блока 23; 29 – АЦП блока 23.

Блок КВТО имеет прямую связь с устройствами блокировки. Это необходимо для моментальной остановки процесса перегрузки в случае возникновения нештатной ситуации.

Подробный анализ системы управления перегрузочной машины с гибким подвесом МПК позволил выявить слабые звенья, дублирующие элементы.

Новая функция для системы управления позволяет контролировать процесс наведения на объект, уровень натяжения троса и качество соединения захватного механизма с объектом перегрузки.

Представленная функция находится на стадии тестирования, но уже на этом этапе показывает не плохие результаты. После полной отладки вся система будет упрощена.

Список литературы

1. Шиянов, А.И. Системы управления перегрузочных манипуляторов АЭС с ВВЭР/ А.И. Шиянов, М.И. Герасимов, И.В. Муравьев.- М.: Энергоатомиздат., 1987.-176 с.
2. Пат. 2319236 Российская Федерация С1 МПК 621С 19/00 (2006.01). Устройство перегрузки топливных элементов в ядерном реакторе перегрузочными машинами с гибким подвесом объектов/Кравченко П.Д., Яблоновский И.М, Магалисов В.С, заявл. 06.06.2006; опубл. 10.03.2008. Бюл. № 7.

М.А. ЦАПЛИН

Научные руководители – В.В. МАСЛЕННИКОВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ PID-РЕГУЛЯТОРА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

Рассмотрены различные подходы к выбору соотношений параметров PID-регулятора с целью оптимизации управления в системе автоматического регулирования (САР) сканирующего зондового микроскопа (СЗМ).

При рассмотрении СЗМ одной из инженерных проблем, не нашедших до сих пор достаточно эффективного решения, является возникновение паразитных резонансов подвижного стола с пьезокерамическим актюатором [1-3] по вертикальному z-направлению. Оптимизация системы управления с целью устранения влияния этих резонансов крайне важна для повышения точности измерений и избавления от артефактов, возникающих при сканировании.

В первом приближении можно рассматривать объект управления в рамках поставленной задачи как простейшее колебательное звено второго порядка с передаточной функцией (ПФ) вида:

$$G(p) = \frac{G_0}{(p^2 + \frac{\omega_0}{q_0}p + \omega_0^2)}.$$

В качестве регулятора был выбран PID-регулятор, включаемый в цепь обратной связи, как наиболее универсальное, простое и хорошо зарекомендовавшее себя инженерное решение.

Введение PID-регулятора с ПФ вида:

$$R(p) = \frac{(1 + p\tau_2)(1 + p\tau_3)}{p\tau_1}$$

в систему автоматического регулирования СЗМ приводит к следующему характеристическому уравнению:

$$p^3 \tau_1 + p^2 \left(\frac{\omega_0^2 \tau_1}{q_0} + G_0 \tau_2 \tau_3 \right) + p(\omega_0^2 \tau_1 + G_0 \tau_2 + G_0 \tau_3) + G_0 = 0.$$

В [4] приведена простая приближенная формула для оценки добротности подобной системы. С учетом рассмотрения различных методов выбора параметров PID-регулятора [5-10] было установлено, что проведенный анализ с использованием этой формулы быстрее и проще.

Полученные результаты дают возможность существенно повысить быстродействие рассмотренной САР сканирующего зондового микроскопа при сохранении качества изображений.

Список литературы

1. Croft, D. Creep, Hysteresis and Vibration Compensation for Piezoactuators: Atomic Force Microscopy Application/ D.Croft, G.Shed, S.Devasia// Journ. of Dynamic Syst., Measurements, and Control – 2001. – Vol. 123, №3. – pp. 35 – 43.
2. Jung, H. Creep characteristics of piezoelectric actuators/ H.Jung, D.G.Gweon// Review of Scientific Instruments – 2000. – Vol. 71, №4. – pp. 1896 – 1900.
3. Meshtcheryakov, A.V. Scan speed control for tapping mode SPM/ A.V. Meshtcheryakov, V.V. Meshtcheryakov// Nanoscale Research Letters 2012, 7:121.
4. Масленников В.В. Метод приближенного определения корней кубического уравнения с положительными коэффициентами и комплексно-сопряженными корнями. // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» – 2015. – Т. 4, №2, С. 179-182.
5. Довгополая Е. А., Масленников В.В., Мещеряков В.В. Метод анализа систем автоматического регулирования, описываемых кубическим характеристическим уравнением // Научная сессия МИФИ - 2015. Сб. науч. тр.: - 2015. - Т.1 - С.160.
6. Довгополая, Е.А. Оптимизация системы автоматического регулирования сканирующего нанотвердомера // Научная сессия МИФИ – 2015. Сб. науч. тр.: 2015. - Ч.1 - С.36-37.
7. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. V. 64. P. 759-768.
8. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74, pp. 175–185.
9. Astrom K.J. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Ed.: K.J. Astrom, T. Hagglund. NC: ISA, 1995. 408 p.
10. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.

А.И. МАКСИМКИН¹, А.Н. СЕМЕНЕНКО², М.А. ФРОЛОВ¹,
И.С. КРЮКОВ¹

Научный руководитель – И.А. ТУТНОВ¹, д.т.н., профессор

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Национальный исследовательский университет «ВШЭ», Москва

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На примере построения автоматизированных систем мониторинга радиационной обстановки, реализуемых по схеме беспроводных сенсорных сетей представлена схема автономного обеспечения питания с использованием источников возобновляемой энергии.

Вокруг объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) постоянно или в случае возникновения аварии необходимо обеспечить мониторинг радиационной обстановки с целью выявления и определения степени радиационного загрязнения, изучения характера распространения «пятна» загрязнения. В таких ситуациях могут применяться стационарные и/или портативные измерительные комплексы. Однако они требуют наличие инфраструктуры для обеспечения их функционирования.

Для обеспечения возможности развертывания систем на труднодоступной непроходимой местности, исключения непосредственного участия человека с целью снижения дозовой нагрузки на персонал и значительного увеличения срока службы системы необходимо разработать систему питания, позволяющую автономно работать устройствам в течение нескольких лет.

Возникает проблема обеспечения питания, особенно это касается детектирующего узла, который предъявляет высокие требования качеству и уровню питания. Например, для питания современного полупроводникового детектора на основе кремния (ПДПГ-ообП, ОАО «СНИИП», Россия) требуется питание напряжением не ниже 48 В, обладающего высокой стабильностью. Также стоит отметить, что помимо узла детектирования среди серьезных потребителей еще имеются модули геопозиционирования GPS/GLONASS и передачи данных по радиоканалу или по сетям GSM/3G.

Подобные системы нами уже разворачивались в условиях помещений, где допустимо использование упрощенной схемы детектирующей установки – связка узла детектирования с персональным компьютером посредством интерфейса USB (5 В, 100 мА). В таком случае достаточно бы-

ло просто обеспечить повышение с 5 до 50 вольт, что на сегодня является достижимой задачей.

Когда мониторинг происходит на открытой местности, возникает необходимость использования возобновляемых источников питания. Наиболее доступным для нас источником энергии является солнце. Солнечные батареи уже достаточно хорошо развиты и обеспечивают вполне достойные характеристики, но все же недостаточные для постоянной работы полупроводникового детектора. Поэтому целесообразным будет переход на режим импульсного питания, когда в строго определенное время метка просыпается, проходит этапы измерения фона, обработки и передачи данных и уходит обратно в спящий режим до тех пор, пока не пополнится запас энергии батареи.

Для достижения поставленной цели создан макет устройства обеспечения управления питанием в импульсном режиме. Подобное решение уже применялось и зарубежом носит название «Energy Harvesting», но в таком ключе применяется впервые.

Устройство состоит из самого солнечного элемента, хранилища энергии – аккумулятора, схемы повышения питания 5-50В и схемы контроля состояния питания солнечной батареи и хранилища энергии. Схема контроля питания управляет подачей энергии с солнечной батареи в зависимости от освещенности и защищает аккумулятор от разряда путём отключения её от схемы. Главная особенность схемы управления питания заключается в сверхнизком потреблении питания как в активном, так и в спящем режиме.

Проведенные испытания показали, что разработанная схема способна после десяти минут на солнце обеспечить до 20 секунд работы всего устройства. В настоящий момент ведется подготовка к испытаниям опытного образца.

Список литературы

1. Maksimkin A.I., Baryshev G.K., Semenenko A.N., Rodko I.I., Varyatchenko E.P., Ostrovskii V.R. System of pulsed solar energy supply of ionizing radiation detectors / Bulletin of the Lebedev Physics Institute, ALLERTON PRES, INC., July 2014, Volume 41, Issue 7, pp 205-208.
2. Портативный USB-дозиметр для контроля радиационной обстановки на рабочем месте /Т.М. Халфин, А.И. Максимкин, Р.А. Панасенко/Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012. Сборник трудов XI международной научно-практической конференции. – М.:ДМК Пресс, 2012, с.407-408.

ЙЕ НАУНГ

Научный руководитель – А.В. ЩАГИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

РЕЖИМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СЕРВОПРИВОДОВ НА ВЫСОКОТОЧНЫХ СИСТЕМАХ ПОЗИЦИРОВАНИЯ

С развитием производства и появлением новых технологий ужесточаются требования, предъявляемые к сервоприводам. Современные технологические процессы требуют разработки сервоприводов, имеющих повышенное быстродействие, точность и способность быстрой адаптации к изменению режимов работы.

В современном производстве к сервоприводу предъявляются высокие требования по следующим параметрам: точность позиционирования, диапазон регулирования, неравномерность частоты вращения, перегрузочная способность.

Во многих применениях электрический сервопривод используется для регулирования положения. Для получения хороших динамических характеристик регуляторы скорости и тока подчинены регулятору положения, при этом регулятор положения выполнен как чисто пропорциональный регулятор. Наличие интегрирующей части приводило бы к недопустимому перерегулированию при подходе к точке позиционирования. Интегральная часть подчиненного регулятора скорости служит для того, чтобы уменьшить статическую ошибку регулирования.

Регулирование скорости состоит из контура скорости с включенным на входе блоком ограничения, с помощью которого поступающий задающий сигнал ограничивается значением, соответствующем максимальной скорости. Когда привод достигает максимальной скорости, он поддерживает ее. Если двигатель перегружен, то ток достигает значения ограничения и привод не увеличивает скорость до заданного значения. В режиме регулирования момента скорость в нормальном случае не достигает значения $n_{\max}$, так как работает ограничение тока. Установившийся ток соответствует сигналу задания тока. Двигатель при этом работает в режиме регулирования момента. Если момент нагрузки недостаточен, чтобы достигнуть задания тока, двигатель ускоряется до скорости $n_{\max}$.

Список литературы

1. Л.С. Удут, Н.В. Гусев, М.А. Нечаев Исследование синхронного следящего электропривода на базе сервопривода «MINAS A4» и контроллера движения «PCI-Servo-4».
2. Сервоприводы. Основы, характеристики, проектирование. Издание подготовлено на основе документа SEW-EURODRIVE "Drive Engineering - Practical Implementation. Volume 7. Servo Drives. Basics, Characteristics, Project planning", 0922 4610/1196.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА, МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГОНАПРЯЖЕННОЙ ТЕХНИКИ



Р.А. ВАЛИКОВ

Научный руководитель – Н.В. ВОЛКОВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЛИНОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ

Разработка технологии ионного легирования приповерхностных слоев длиномерных цилиндрических изделий позволит повышать коррозионную стойкость существующих оболочек ТВЭЛов из сплавов циркония, а также разрабатываемых ТВЭЛов для реакторов на быстрых нейтронах из коррозионно-стойкой стали без изменения, увеличивая срок их кампании.

В МИФИ на кафедре «Физических проблем материаловедения» была создана установка ИЛУР-03 для очистки и полировки внешней поверхности цилиндрических изделий пучком ионов с широким энергетическим спектром. Разработанный ионный источник коаксиального типа позволяет проводить равномерную по окружности обработку поверхности с глубиной модифицированного слоя до 500 нм.

К настоящему моменту установка ИЛУР-03 была модифицирована. Установлена магнетронная камера, позволяющая производить напыление тонких пленок легирующих элементов (3 магнетрона) для их последующего внедрения в приповерхностный слой под действием ионного пучка. Разработано шлюзовое устройство, позволяющее проводить обработку длиномерных изделий на проход. Автоматизирована система управлением магнетронами и подачей изделий в зоны обработки.

Проведено обоснование возможных комплексов легирующих элементов, позволяющих повысить сопротивление общей и нодулярной коррозии оболочек ТВЭЛов из сплава Э110 на губчатой основе.

Предварительные исследования показали возможность значительного замедления кинетики окисления за счет создания аморфных состояний в приповерхностном слое.

А.С. ЯШИН

Научный руководитель – Н.В. ВОЛКОВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СОЗДАНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ НА МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДАМИ ИОННО-ПУЧКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлены результаты работ по разработке способа повышения стойкости материалов ядерной техники против окисления при рабочих и повышенных температурах (до 1200 °С) путем создания антикоррозионных слоев, препятствующих проникновению коррозионно-активных элементов, методами ионно-пучковых технологий.

Развитие современной ядерной энергетики требует ужесточения условий эксплуатации элементов активной зоны. Одним из главных факторов, ограничивающих срок службы твэлов водо-водяных реакторов, как в рабочих, так и в аварийных условиях, является окисление и наводороживание оболочек из циркониевых сплавов, которые могут привести к последующему разрушению материала.

Сотрудниками кафедры №9 НИЯУ МИФИ ведутся работы по разработке метода ионно-пучкового модифицирования внешней поверхности оболочек твэлов, обеспечивающего повышение их коррозионной стойкости в рабочих и аварийных условиях эксплуатации. Результаты экспериментов, выполненных на установках ИЛУР-03 и КВК-10, показывают, что обработка в режимах очистки, полировки и ионного легирования материала оболочек, может способствовать формированию плотного оксидного слоя, являющегося эффективным барьером для проникновения коррозионно-активных кислорода и водорода в рабочих условиях водо-водяных реакторов типа ВВЭР.

Обоснован выбор предполагаемых режимов ионной обработки для замедления высокотемпературной коррозии циркониевых сплавов, используемых для оболочек твэлов водо-водяных реакторов, сделанный на основе анализа результатов предварительных экспериментов, литературных данных и термодинамических оценок.

Список литературы

1. B.A. Kalin, N.V. Volkov, R.A. Valikov, A.S. Yashin Using a wide-aperture ion beam to finish the outer surfaces of tubular samples // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 78 (6), pp. 553-557.

С.В. ЧЕКАНОВ

Научные руководители – М.Г. ИСАЕНКОВА, д.ф.-м.н., профессор

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, д.ф.-м.н., профессор

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ СВЕРХУПРУГОГО СПЛАВА Ti-22%Nb-6%Zr ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОГО ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА

Исследование зависимостей мартенситных превращений в сверхупругом сплаве Ti-22%Nb-Zr6% с помощью рентгеновского метода обобщенных полюсных фигур, показало, что:

- при сжатии деформационное упрочнение, обусловленное $\beta \rightarrow \alpha''$ превращением, существенно выше в зернах с плоскостью прокатки $\{100\}$, чем в зернах с плоскостью прокатки $\{111\}$;

- микродеформации решетки в зернах β и α'' -фазы под нагрузкой перераспределяются таким образом, чтобы в большей степени способствовать макродеформации образца;

- наиболее интенсивное $\beta \rightarrow \alpha''$ превращение происходит в зернах, где $\Delta d / d_{av} > 0$, наиболее склонных к увеличению объема решетки.

Диаграммы взаимной корреляции субструктурных параметров, построенные на основе обобщенных полюсных фигур, показывают, что в образце под нагрузкой отклонение межплоскостного расстояния от средневзвешенного уровня способствует активизации мартенситного превращения, при котором уширение рентгеновской линии минимально.

Основными механизмами деформации сверхупругого сплава Ti-22%Nb-6%Zr (ат. %) являются взаимное смещение атомов в кристаллической решетке сплава и образование обратимого мартенсита деформации (МД) $\beta \leftrightarrow \alpha''$, где β – аустенитная фаза с кристаллической решеткой ОЦК, а α'' – мартенситная фаза с орторомбической решеткой [1]. Образование обратимого МД при комнатной температуре в рассматриваемом сплаве при малости внешнего напряжения σ обуславливает эффект сверхупругости, величина которого оказывается ориентационно-зависимой из-за наличия ориентационного соотношения между кристаллическими структурами β и α'' -фаз.

Зависимость распределения зерен образующейся фазы от ориентации исходной матрицы определяется кристаллографической текстурой прокатанной фольги и направлением воздействия внешних напряжений. В рамках данной работы проведены текстурные исследования образцов на рентгеновских дифрактометрах ДРОН-3 и BRUKER D8 DISCOVER. По-

строены прямые текстурные полюсные фигуры (ППФ) $\{100\}$, $\{110\}$ и $\{111\}$ для β -фазы, а также обобщенные ППФ (ОППФ), характеризующие распределение на стереографической проекции относительные отклонения параметра решетки $\Delta d/dcp$ и угловой полуширины рентгеновской линии $\beta 002$, характеризующей фрагментацию и упругие искажения в решетке β -фазы [2].

Фольга из сплава Ti-22%Nb-6%Zr получена путем холодной прокатки горячекованой пластины до 97% деформации по ее толщине. Далее фольги толщиной $\sim 0,2$ мм и размером 17×17 мм накручивали на оправку диаметром 10 мм вдоль или поперек направления прокатки (НП или ПН, соответственно). Это соответствовало деформации противолежащих поверхностных слоев фольги растяжением или сжатием вдоль или поперек направления прокатки на $\sim 1,5\%$. Скрученные в разных направлениях фольги отжигали при температуре 700°C, – при этом в фольге проходила рекристаллизация, формировалась текстура рекристаллизации и устранялась обусловленная холодной прокаткой субструктурная неоднородность. Затем отожженные скрученные фольги распрямляли и наклеивали на держатель текстурной приставки, таким образом, чтобы при регистрации ППФ получить информацию от растянутых или сжатых поверхностей фольги, выпрямленной до плоского состояния. Под воздействием сжатия или растяжения, направленных вдоль НП или ПН, в фольге происходит образование МД.

Таким образом, из данных рентгеновского метода построения ОППФ показано, что:

- при сжатии в зернах с плоскостью прокатки $\{001\}$ обусловленный $\beta \rightarrow \alpha''$ превращением наклеп значительно больше, чем в зернах с плоскостью прокатки $\{111\}$;
- в зернах β - и α'' -фаз микродеформация решетки при нагружении перераспределяется таким образом, чтобы в наибольшей мере способствовать макродеформации образцов;
- наиболее интенсивное $\beta \rightarrow \alpha''$ превращение происходит в зернах, где $\Delta d/dcp > 0$, более всего склонных к увеличению объема решетки.

Список литературы

1. Jae Il Kim et al. Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Shape Memory Characteristics of Ti–22Nb–6Zr (at%) Biomedical Alloy – Materials Transactions, 2006, Vol. 47, No. 3, pp. 505–512.
2. Исаенкова М.Г., Перлович Ю.А. Закономерности развития кристаллографической текстуры и субструктурной неоднородности в циркониевых сплавах при деформации и термообработке. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 528 с.

П.Л. ДОБРОХОТОВ

Научный руководитель – М.Г. ИСАЕНКОВА, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРНОЙ И СУБСТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ТРУБАХ ИЗ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ ДУО СТАЛЕЙ

Изучено формирование послойной неоднородности текстуры и субструктурного состояния в трубах из ферритно-мартенситных ДУО сталей на разных этапах их изготовления. Установлена зависимость механических свойств труб от выявленной неоднородности, предложен механизм, объясняющий формирование неоднородности текстуры и субструктуры.

Стали ферритно-мартенситного класса дисперсно упрочненные оксидами (ДУО) являются одними из наиболее вероятных кандидатов в конструкционные материалы будущих ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Основное их преимущество перед прочими конструкционными материалами состоит в низкой склонности к радиационному набуханию в условиях облучения при одновременном сохранении высокого уровня механических свойств при повышенных температурах.

Известно, что физические и механические свойства определяются структурно-фазовым состоянием исследуемого материала, в частности сформированной при обработке текстурой (т.е. преимущественной ориентацией кристаллической решетки) и особенностями субструктурного состояния (т.е. структурного состояния материала в пределах зерна) [1, 2]. Основными этапами процесса изготовления оболочек твэлов являются прокатка и термообработка – процессы, неизбежно приводящие к формированию определенной текстуры и субструктурного состояния в материалах [1]. Основные свойства конечных изделий из сталей, таким образом, определяются особенностями обработки на последовательных этапах их изготовления. Поэтому изучение закономерностей формирования текстуры и субструктурного состояния в стали ферритно-мартенситного класса ЭП450 ДУО и выявление зависимости механических свойств от установленных особенностей явилось целью данной работы.

В работе использованы как классические методы рентгеновского текстурного и структурного анализа, так и оригинальный метод построения обобщенных прямых полюсных фигур (ОППФ) [2,3], позволяющий рассматривать субструктурное состояние зерен – мелкодисперсность струк-

туры и микроискажения кристаллической решетки – в зависимости от их преимущественной ориентации.

Исследование труб из стали ЭП450 ДУО как после прокатки, так и после термообработки показало, что текстура и структура существенно различаются по толщине труб: во внешних слоях преобладает текстурная компонента $\{100\}<011>$, тогда как во внутренних – компонента $\{111\}<011-112>$. При этом внешние слои, по сравнению с внутренними слоями, характеризуются размытием текстурных максимумов и большими значениями полуширины рентгеновских линий, определяющей субструктурное состояние материала вдоль выбранных направлений.

Известно [4], что зерна, ориентированные согласно двум основным текстурным компонентам, обладают различной морфологией, пластичностью и степенью деформационного наклепа. В прокатанном материале образуются чередующиеся слои, состоящие из зерен разной ориентации и с различными свойствами. В случае трубы из ферритно-мартенситной стали ЭП450 ДУО количество зерен, которым соответствуют компоненты с плоскостью прокатки $\{100\}$ и $\{111\}$, различно во внешних и внутренних слоях трубы, что сопровождается изменением микротвердости, измеренной в перпендикулярном L-направлению сечении трубы вдоль толщины: значения микротвердости внешних слоев выше, чем внутренних слоев.

Текстурная и субструктурная неоднородность труб из исследованных сталей объясняется различием значения Q-фактора, равного отношению обжатий по толщине стенки и по диаметру трубы при ее прокатке [5]. Значение Q-фактора максимально для внешней поверхности трубы и минимально для внутренней, что определяет различие в текстуре и субструктурном состоянии труб и обуславливает текстурную и субструктурную неоднородности.

Список литературы

1. Уманский Я. С., Скаков Ю. А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. // М.: Металлургия, 1982, 632 с.
2. Исаенкова М. Г., Перлович Ю. А. Закономерности развития кристаллографической текстуры и субструктурной неоднородности в циркониевых сплавах при деформации и термообработке: Монография. // М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 528 с.
3. Perlovich Yu., Bunge H.J., Isaenkova M., Fesenko V. The Distribution of elastic deformation in textured materials as revealed by peak position figures. // Material Science Forum, 1998, v. 273-275, p. 655-666.
4. Полухин П. И., Горелик С.С., Воронцов В. К. Физические основы пластической деформации. // М. Металлургия, 1982. 584 с.
5. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. // М.: Энергоиздат, 1994. – 256 с.

В.В. МИХАЛЬЧИК

Научный руководитель – В.Г. БАРАНОВ, к.т.н., с.н.с.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НИТРИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ РЕАКТОРОВ IV ПОКОЛЕНИЯ

Проведено исследование термической диссоциации нитридного ядерного топлива, используемого для быстрых реакторов с замкнутым топливным циклом. Изучение данной проблемы необходимо для оценки рисков выделения жидкого урана и испарения актиноидов в процессе фабрикации и эксплуатации ядерного топлива.

Наиболее перспективным топливом для реактора IV поколения со свинцовым теплоносителем является смешанное нитридное ядерное топливо, которое в сравнении с широко используемым оксидным топливом имеет более высокую плотность и теплопроводность. Однако нитридное ядерное топливо имеет серьезный недостаток: относительно низкую термическую стабильность, что может приводить к частичному разложению моонитрида урана с образованием жидкой фазы, а также к значительному испарению смешанного нитрида.

Всесторонние экспериментальные исследования термической стабильности нитридного ядерного топлива уже проводились ранее [1,2], однако, имеющиеся данные не позволяют оценить безопасность нитридного топлива при эксплуатации и в процессе фабрикации. В данной работе основной задачей является изучение кинетики процесса диссоциации и испарения нитридного ядерного топлива для прогнозирования поведения в реальных промышленных изделиях.

Образцы моонитрида урана для исследований термической стабильности синтезировались из чистого металла путем гидрирования-дегидрирования и последующего нитрирования. Для имитирования выгорания 100 и 200 ГВт·сут./тУ и накопления ПД с минорными актиноидами, в моонитрид урана добавлялось 10 и 20 масс.% нитрида мишметалла.

Для исследования термической диссоциации использовалось несколько экспериментальных методов, результаты которых взаимосвязаны и подтверждают друг друга. Высокотемпературные испытания проводились в синхронном термическом анализаторе Netzsch STA 449 F1, позволяющем получать зависимость потери массы образцов от температуры. Микроструктурные исследования проводились с помощью растрового электронного микроскопа JEOL-6610LV с энергодисперсионным рентгенов-

ским анализатором. Все операции с нитридным топливом проводились в специальном аргоновом боксе для исключения окисления.

Исследование термической диссоциации нитридного топлива проводилось в высокочистом гелии при температурах выдержки 2073-2373 К, с использованием методики разработанной нами ранее [3]. Экспериментальные данные показали, при увеличении температуры выдержки, максимальная скорость потери массы мононитрида урана возрастает экспоненциально. Построение аррениусовской зависимости позволило посчитать энергию активации основного процесса. Полученное значение соответствует теплоте испарения урана и, следовательно, основной вклад в потерю массы приносит испарение урана. Растровая электронная микроскопия показала, что после испытаний, на поверхности образцов присутствуют сферические выделения урана, образовавшиеся в процессе диссоциации.

При добавлении нитрида мишметалла в UN скорость потери массы становится еще более высокой. Однако, выделений жидкого урана не наблюдается. Это говорит о подавлении процесса диссоциации при добавлении имитаторов продуктов деления и минорных актиноидов, благодаря расширению области гомогенности UN. Основным механизмом потери массы в смешанном нитридном топливе становится испарение компонентов мишметалла.

В заключение следует сказать, что образцы с более сложным химическим составом более стабильны, чем чистый UN, с точки зрения диссоциации, однако скорость испарения становится выше. При добавлении 10-20 масс.% нитрида мишметалла в UN, температура начала потери массы падает на 200-300 К. Таким образом, крайне важно тщательно выбирать режимы высокотемпературной обработки нитридного топлива для предотвращения диссоциации и активного испарения. Как продукты деления, так и младшие актиноиды будут затруднять процесс переработки смешанного нитридного топлива. В лаборатории будет продолжена работа, направленная на поиск путей, увеличивающих температуру диссоциации и снижающих скорость испарения смешанного нитридного топлива.

Список литературы

1. M. Uno, T. Nishi, M. Takano. Thermodynamic and thermophysical properties of the actinide nitrides. Comprehensive Nuclear Materials, Изд.: R. J. M. Konings, (2012) с. 61-85.
2. Merja Pukari, Experimental and theoretical studies of nitride fuels, Докторская Диссертация, Швеция, (2013) 74 с.
3. В.Г. Баранов, Р.С. Кузьмин, В.В. Михальчик, А.В. Тенишев, J. Advanced Mater. Research 1040 (2014) с. 47-52.

Н.С. ТАРАНОВ

Научный руководитель – Т.А. ЛИТИНОВА, к.т.н., доцент
Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО УПЛОТНЕНИЯ

Проведена модернизация действующей установки электроконтактного уплотнения. Разработана установка ультразвукового электроконтактного уплотнения с широкими технологическими возможностями по формированию порошковых материалов различного функционального назначения. Рассмотрена технология ультразвукового электроконтактного уплотнения.

В настоящее время в различные отрасли промышленности внедряют новые, технически более совершенные технологические процессы получения порошковых материалов и изделий, но и совершенствуют уже известные технологии.

В работах [1-2] рассмотрена технология электроконтактного уплотнения (ЭКУ), основанная на приложении уплотняющего усилия при прямом пропускании электрического тока через уплотняемую шихту. В ранее проведенных исследованиях [3-5] была доказана применимость этой технологии для изготовления деталей из карбонильного железного и распыленного бронзового порошков и конструкционной порошковой стали. В результате установлен факт интенсификации диффузионных процессов и формирования качественного межчастичного сращивания при ЭКУ порошков.

Целью настоящей работы является расширение технологических возможностей ЭКУ для получения порошковой стали с требуемыми свойствами. Для этой цели в данной технологии применили дополнительное внешнее воздействие – ультразвук. Для практической реализации ультразвукового электроконтактного уплотнения (УЭКУ) была проведена модернизация действующей установки ЭКУ. Установка дополнительно снабжается двумя ультразвуковыми головками предназначенными для возбуждения в порошковой шихте продольных и поперечных ультразвуковых колебаний. В корпусе ультразвуковой головки размещен ультразвуковой преобразователь продольных колебаний с волноводной систе-

мой и концентратор с рабочим наконечником на конце. Корпуса ультразвуковых головок закреплены на неподвижной опоре.

УЭКУ осуществляется за одну технологическую операцию, заключающуюся в следующем. Подготовленная навеска шихты засыпается в матрицу, на боковые поверхности которой предварительно наносится слой фторида кальция, с установленным в исходном положении нижним пуансоном. Рабочие торцы пуансонов покрываются графитом ГК-1. Камера продувается аргоном, после чего в полость матрицы устанавливается верхний пуансон.

Подготовленная к прессованию камера устанавливается на стол гидравлического пресса. Порошковую деталь получают методом двухстороннего прессования путем различного по способу приложения заданного давления и одновременного, постоянного (в течении всего времени) спекания порошкового материала прямым пропусканием электрического тока с наложением ультразвуковых колебаний.

Технологический процесс ультразвукового электроконтактного уплотнения (УЭКУ) характеризуется следующими режимами: p – давление прессования, I – плотность тока, A – амплитуда ультразвуковых колебаний, f – частота ультразвуковых колебаний, t_p , t_t , t_A – длительности процессов приложения давления, пропускания тока, возбуждения ультразвуковых колебаний, соответственно. В процессе опробования установки технологические параметры варьировались в следующих интервалах: $p = 100 - 600$ МПа; $I = 10 - 36$ МА/м²; $A = 14 - 25$ мкм; $f = 40 - 70$ кГц; t_p , t_t = 10 – 70 с, t_A = 0,5 – 10 с.

В процессе электроконтактного уплотнения воздействие ультразвука способствует оптимальному распределению частиц порошковой шихты в объеме пресс-формы и катализирует процесс уплотнения.

Список литературы

1. Литвинова Т.А., Егоров С.Н. Закономерности формирования порошковой стали при электроконтактном уплотнении. //Литвинова Т.А., Егоров С.Н. //Металлург. 2013.- № 4.
2. Litvinova T.A., Egorov S.N. The influence of production modes of the electrocontact compaction on the porosity of the powder steel// Russian Journal of Non – Ferrous Metals. - 2011. - Т.52, № 1. - С. 101-102.
3. Егоров С.Н., Мецлер А.А. , Медведев Ю. Ю., Литвинова Т.А. Гомогенизация материала, полученного электроконтактным уплотнением порошковой бронзы// Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. - 2010. - № 3. - С. 51-53.
4. Егоров С. Н., Медведев Ю. Ю. Влияние режимов электропластического уплотнения на пористость порошкового материала: Материалы науч.-практ. конф. «Современные технологии в машиностроении - 2003» 26-27 апр. 2003г./ Пензенский гос. ун-т. Пенза, 2003.
5. Литвинова Т.А., Егоров С.Н., Медведев Ю.Ю. Кристаллографические аспекты гомогенизации железографитовой композиции [Текст] // Металлург, 2010.- № 6. - С. 40-42.

А.Е. КАРПИХИН

Научный руководитель – В.Ф. ШАМРАЙ, д.ф.-м.н., профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПОРОШКОВ α -ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА, ПОДВЕРГНУТЫХ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕМУ ОТЖИГУ

Методами рентгеноструктурного анализа исследованы структурно-фазовые изменения в порошках α -ТКФ, подвергнутых обработке в планетарной мельнице в различных средах, и последующему отжигу при 1300°C.

Трикальцийфосфат (ТКФ, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) принадлежит к большому семейству фосфатных материалов, используемых в биомедицине [1]. Известно, что процесс растворения порошков α -ТКФ в жидкостях при изготовлении цементов контролируется, прежде всего, поверхностными реакциями, зависящими от скорости растворения порошков [2]. Существуют различные способы повышения скорости растворения, и наиболее распространенный – увеличение поверхности контакта частиц с жидкостью за счет измельчения. Фактором, стимулирующим растворение частиц, служит также формирование в них развитой субструктуры, вследствие измельчения микроблоков. В связи с этим, весьма актуальным представляется исследование изменений дисперсности, фазового состава, параметров субструктуры, параметров кристаллической структуры в порошках α -ТКФ в результате измельчения и последующего отжига, применяемого обычно для оптимизации микроструктуры порошков α -ТКФ.

В настоящей работе методами рентгеноструктурного анализа выполнено исследование структурных изменений в порошках α -ТКФ, подвергнутых механоактивации в планетарной мельнице. Однофазный порошок α -ТКФ подвергли помолу в средах бутанола, ацетона, изобутилового спирта, этанола и воды при 60 °С в течении 5, 15 30 и 60 минут и последующему отжигу при температуре 1300°C в течении 2 часов. Структурно-фазовые изменения в порошках исследовали по результатам съемки на рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV в $\text{CuK}\alpha$ излучении. Фазовый анализ выполнен с использованием программного комплекса PDXL. Уточнение структуры и оценка параметров субструктуры методом Рит-

вельда выполнены с использованием программных комплексов MAUD и Jana 2006.

Основные линии дифракционного спектра порошков, подвергнутых механоактивации во всех средах, индифицировались как принадлежащие фазе α -ТКФ. При уточнении модели кристаллической структуры α -ТКФ [3] в исходном порошке уточнили общие параметры (фон, текстуру по Марч-Далассу, асимметрию рефлексов) и атомные координаты (кальция и фосфора). Уточненные координаты катионов отличались от значений, приведенных в [3] несущественно. В дальнейшем эти данные использовали как эталонные для определения параметров субструктуры порошков α -ТКФ подвергнутых механоактивации.

При увеличении времени помола наблюдали размытие рефлексов фазы α -ТКФ. Периоды решетки α -ТКФ существенно не изменялись ($a \sim 12,875$ Å, $b \sim 27,280$ Å, $c \sim 15,214$ Å $\beta \sim 126,207$). Как следует из оценки параметров субструктуры, основной вклад в уширении рефлексов вносило измельчение ОКР. За время помола от 5 до 60 минут размер микроблоков (δ) уменьшался от $\delta \sim 300$ до 80 нм. Микроискажения (Δ) оставались на уровне $\Delta \sim 2 \cdot 10^{-4}$. После механоактивации помимо уширения рефлексов фазы α -ТКФ на дифрактограммах фиксировали дифракционные пики, принадлежащие фазе CF_2 (политетрафторэтилен), появляющейся, по-видимому, вследствие намола. С увеличением времени механоактивации их интенсивность возрастала. После отжига α -ТКФ, помолотого в средах ацетона бутанола и изопропилового спирта в течении 30 минут, установлено присутствие фаз β -ТКФ ($\sim 8\%$) и апатита ($\sim 5\%$), в то время как после термомеханической обработки порошков в этаноле обнаружено значительно большее содержание фазы β -ТКФ ($\sim 28\%$). После механоактивации порошка α -ТКФ в воде и последующего отжига содержание β -ТКФ составляло 92%. Можно предположить, что вода, как среда в которой проводится измельчение порошка α -ТКФ, стимулирует образование β -модификации, а ее присутствие в этаноле обусловило повышенное содержание β -ТКФ.

Список литературы

1. Баринов С М Комлев В С 2005 Биокерамика на основе фосфатов кальция Москва: Наука с 204
2. M.P. Ginebra F.C.M. Driessens J.A. Planell. Effect of the particle size on the micro and nanostructural features of a calcium phosphate cement: a kinetic analysis Biomaterials 2004 V25 p 3453-3462.
3. Mathew M Schroeder L W Dickens B and Brown W E The crystal structure of α - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 1977 Acta Cryst B33 p 1325-1333

НАНОЭНЕРГЕТИКА, МОЛЕКУЛЯРНО-СЕЛЕКТИВНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

А.А. ТИШИН

Научные руководители – Н.И.ЛАГУНЦОВ, к.ф.-м.н., доцент

И.М.КУРЧАТОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Открытое акционерное общество «Аквасервис», Москва

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЦЕОЛИТОВ И АКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ

В работе описано устройство исследовательского комплекса для изучения сорбционных свойств веществ при повышенном давлении, исследована возможность использования цеолитов NaA, NaX, CaA, CaX, NaX-БКО в гибридных мембранно-сорбционных установках.

В работе [1] описана принципиальная схема стенда для исследования сорбционных свойств материалов. Взяв за основу эту схему, дополненную электрическими датчиками давления, емким ресивером, системой автоматического управления и сбора данных, были проведены исследования свойств цеолитов NaA, NaX, CaA, CaX, NaX-БКО. Необходимость исследования свойств данных цеолитов обусловлена наличием КЦА ступени в гибридной мембранно-сорбционной системе [2] эффективность которой описана в работе [3].

Созданный комплекс включает в себя лабораторную установку, устройство сбора данных и автоматическую систему управления физическим экспериментом, приложение, позволяющее управлять экспериментом и считывать данные с датчиков и программу обработки результатов экспериментов. Общая схема комплекса представлена на рис. 1.

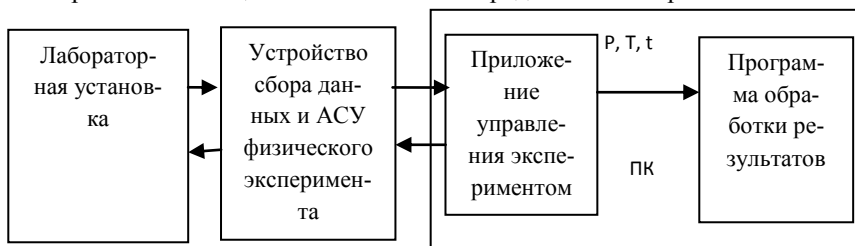


Рис.1.

Подробное описание лабораторной установки и принцип ее работы представлены в работе[1]. Установка дополнена 10 литровым ресивером, электромагнитными клапанами, датчиками давления и температуры. Сигналы датчиков поступают на устройство сбора данных, управление клапанами осуществляется устройством автоматической системы управления. Устройство сбора данных передает сигналы с датчиков приложению на персональном компьютере. Приложение реализовано в среде Visual Studio 2010 на языке C#, оно позволяет задавать режимы включения и выключения клапанов и вакуумного насоса, осуществить в режиме реального времени мониторинг давления и температуры газа в установке, осуществить запись и сохранение результатов эксперимента в текстовый документ, пригодный для дальнейшей обработки. Программа обработки реализована с помощью программы математического моделирования MATLAB 7. Результатом работы программы является построение изотерм сорбции, по которым можно сделать однозначный вывод о целесообразности использования данного сорбента, в частности в гибридной мембранно-сорбционной установке[4].

С помощью разработанного комплекса были исследованы цеолиты NaA, NaX, CaA, NaX-БКО. Цеолиты NaA, NaX для разделения воздуха оказались не пригодны. CaA показал высокую селективность в области низких давлений и ее полное отсутствие в области высоких давлений. NaX-БКО смесь кислород-азот не делит, но имеет высокую емкость по углекислому газу и может быть использован в мембранно-сорбционной системе на стадии предварительной подготовки газа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект №14.579.21.0046.

Список литературы

1. Тишин А.А., Лагунцов Н.И., Курчатov И.М. Исследование разделительных свойств цеолитов в процессах короткоциклового адсорбции.// XVIII Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука», тезисы докладов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 47-48.
2. Кудинов А.Н., Лагунцов Н.И., Курчатov И.М. Эжекторное мембранно-сорбционное устройство для разделения газовых смесей Патент на полезную модель № 139877 по заявке №2013143693 от 27.09.2013, бюл. № 12 от 27.04.2014 г.
3. Кудинов А.Н., Пермяков М.М. Эффективность процесса газоразделения в гибридных мембранно-сорбционных системах. //XVI Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука», тезисы докладов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2013. 140-141с.
4. Королев М.В., Лагунцов Н.И., Курчатov И.М. Исследование одноконтурной мембранно-сорбционной системы для обогащения воздуха кислородом.// XVIII Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука», тезисы докладов. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 45-46.

И.Е. СКУРИДИН

Научные руководители – Н.И. ЛАГУНЦОВ, к.ф.-м.н., доцент

И.М. КУРЧАТОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

ОАО «Аквасервис», Москва

ОБРАТНЫЙ АСИММЕТРИЧНЫЙ ГАЗОТРАНСПОРТНЫЙ ЭФФЕКТ В ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАНАХ

В работе исследовалось, как изменяется значение проницаемости различных газов от ориентации полимерной газовой мембраны в широком диапазоне давлений. Экспериментально установлены закономерности асимметрического переноса газовой фазы через ПВТМС-мембрану и показано, что наблюдается эффект обратной асимметрии, когда проницаемость со стороны пористой подложки значительно превышает проницаемость со стороны непористого селективного полимерного слоя.

Проницаемость газов в газоразделительных мембранах, в зависимости от выбранного направления градиента давления, может сильно различаться, т.е. наблюдается явление несимметричного переноса газа. Существует ряд работ, в которых обнаружена асимметрия проницаемости в подобных средах и предложены соответствующие модели описания этого процесса [1,2].

Явление обратной анизотропии было впервые обнаружено в работе [3].

В данной работе исследуется асимметрия проницаемости на газоразделительной асимметричной полимерной мембране из поливинилтриметилсилана (ПВТМС). Мембрана из ПВТМС условно имеет 3 выраженных слоя: непористый диффузионный (селективный) толщиной $70 \div 100$ нм, мелкопористый толщиной $10 \div 15$ мкм с размером пор до 300 нм и слой с крупными (до 4 мкм) транспортными порами [4]. Таким образом, ПВТМС мембрана представляет собой градиентную пористую среду, т.е. среду, состоящую из пористого слоя с изменением по толщине радиуса пор и пористости, и непористого селективного слоя.

Исследования были проведены на таких газах, как углекислый газ, азот, кислород, гелий. Для всех используемых газов в эксперименте удалось детектировать и верифицировать эффект обратной асимметрии, значение потока для некоторых газов со стороны пористой подложки может превышать значение потока со стороны селективного слоя до трёх раз.

В частности, было показано, что проницаемость различных газов не зависит от перепада давления в широком интервале давлений, но в области малых давлений проницаемость значительно увеличивается с ростом давления до определенного значения. Подобное изменение может быть объяснено сменой режима газопроницаемости: от квазиравновесного состояния к неравновесному, когда концентрация растворенных в полимере газовых молекул не определяется соответствующей константой Генри, а зависит от состояния поверхности мембраны. [5]

На основе данного эффекта, а в частности, полученных данных о коэффициентах проницаемости, селективности и анизотропии для различных компонентов газовой смеси становится возможным создание установки для получения искусственной атмосферы с возможностью регулирования содержания CO_2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по соглашению №14.579.21.0046. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57914X0046.

Список литературы

1. О влиянии поверхностного потока на анизотропию проницаемости / А.В. Крюков, И.М. Курчатова, Н.И. Лагунцов // Мембраны и мембранные технологии, 2013, том 3, № 1
2. On the Reverse Asymmetric Gas Transport Effect in the Polymer Membranes / I.E. Skuridin, I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov // Physics Procedia, Volume 72, 2015, Pages 113–116
3. Direct and reverse anisotropy of permeability in asymmetric gas separation membranes / I.M. Kurchatov, N.I. Laguntsov // Proceedings of the XXV International symposium on physico-chemical methods of separation “ARS SEPARATORIA”, Torun, Poland, 2010, p.286
4. Мембранное разделение газов / Ю.И. Дытнерский, В.П. Брыков, Г.Г. Каграманов // М., Химия, 1991, 344с.
5. Тимашев С.В. / Физико-химия мембранных процессов // Moscow “Chemistry”, 1988, 240с.

А.С. МИТРОФАНОВА

Научный руководитель – В.А. БЫРКИН, к.ф.-м.н., ассистент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ СФЕР РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРОВ ДЛЯ НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Предложен метод аналитического описания модели перекрывающихся сфер различных размеров для неупорядоченной пористой среды. Вычислены двухточечная корреляционная функция, поверхностная функция и функция распределения ближайших соседей. В рамках данной модели была получена зависимость числа ближайших соседей от расстояния между центрами сфер.

В настоящее время проявляется большой интерес к исследованию нанопористых материалов. Прежде всего, это связано использованием пористых сред в гибридных наносистемах, позволяющих создать искусственные мышцы, приборы для регулируемого выделения веществ, лекарств при изменении температуры, систем пассивной тепловой защиты.

Актуальность данной работы состоит в том, что данная модель учитывает корреляционные эффекты, возникающие в неупорядоченной пористой среде, тем самым, позволяя объяснить такие эффекты как: гистерезис, невымывание жидкости из пористой среды, тепловые эффекты.

Рассматривается модель неупорядоченной пористой среды, состоящая из хаотически расположенных пересекающихся сфер различных размеров. Роль пустот представляет собой пространство внутри сфер, а все остальное пространство представляет твердую фазу.

Вычислена корреляционная функция взаимного расположения пор различных размеров для модели перекрывающихся сфер [1, 2]:

$$S_2(r) = \begin{cases} \exp[-2\eta], & r > 2R \\ \exp\left[-\eta\left(1 + \frac{3r}{4R} - \frac{1}{16}\left(\frac{r}{R}\right)^3\right)\right], & r < 2R \end{cases}$$

С помощью двухточечной корреляционной функции можно вычислить зависимость числа ближайших соседей от расстояния между центрами, проинтегрировав двухточечную функцию распределения [2, 3]:

$$Z(r) = \frac{1}{\varphi \cdot v_1(R)} \int_0^r 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot S_2(r) dr$$

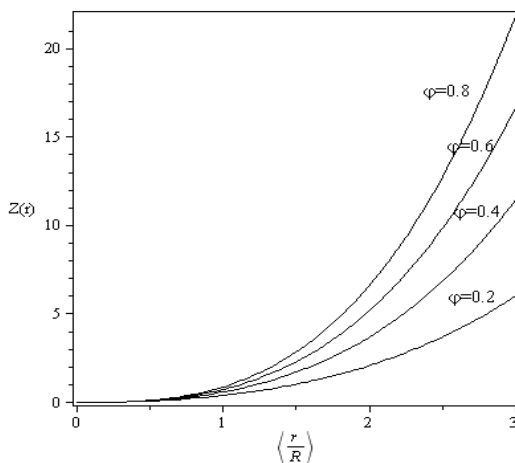


Рис.1. Зависимость числа ближайших соседей от расстояния между центрами сфер, обезразмеренного на средний радиус пор для различных значений пористости

Список литературы

1. Torquato S. Random heterogeneous materials: Microstructure and macroscopic properties. New York: Springer, 2002.
2. V.A. Byrkin, The Parameters of the Disordered Nanoporous Medium. Physics Procedia, Volume 72, 2015.
3. Хейфец Л. И., Неймарк А. В. Многофазные процессы в пористых средах. Москва: Химия, 1982.

П.А. ЛИХОМАНОВА

Научные руководители – И.В. ТРОНИН, к.ф.-м.н.

А.М. ГРЕХОВ, к.ф.-м.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА ПАКЕТА ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТА И СТРУКТУРЫ ГИБРИДНЫХ МЕБМРАН

Ведется разработка программного пакета для расчёта характеристик селективного транспорта в полимерных мембранах с внедрёнными наночастицами. Такие гибридные мембраны в настоящее время интенсивно исследуют и внедряют в

новых методах очистки и разделения жидкостей и газов, в том числе для задач атомной промышленности. Разрабатываемый пакет позволяет проводить численные исследования эффективности мембран с различной структурой внедренных наночастиц.

В мембранных технологиях для разделения газов и жидкостей в промышленных масштабах используются полимерные мембраны. При этом мембраны из полимеров с наночастицами (mixed matrix membranes), по транспортным характеристикам достигли уровня наиболее эффективных мембран. Такие мембраны планируют использовать для решения уникальных задач в области мембранного разделения жидкостей и газов в атомной промышленности, микроэлектронике и фармакологии.

Как оказалось, внедрение неорганических наночастиц в полимер существенно улучшает селективность и проницаемость мембран, при сохранении прочностных характеристик. Эксперименты, подтверждающие данное явление описаны в работах [1,2]. Однако концепция, связывающая теоретическое описание ускорения транспорта с полученными экспериментальными данными до сих пор не имеет ясного обоснования. Решением данной проблемы могут быть предварительные исследования новых мембранных материалов методами компьютерного моделирования.

С помощью разработанных программ было проведено моделирование диффузионных процессов в гибридных мембранах, состоящих из анизотропной матрицы (полимер) с внедрёнными нанотрубками. (Геометрия исследованных систем соответствует параметрам полимерных наноструктурированных мембран с углеродными нанотрубками). Показано, что необходимым условием увеличения проницаемости мембран является образование перколяционного кластера из нанотрубок, транспорт через который определяет существенное увеличение коэффициента диффузии. Такое моделирование позволяет рассчитать структурные параметры мембран, наночастиц и селективные свойства гибридных мембран для различных жидкостей и газов, а также условия максимальной эффективности процесса разделения.

Список литературы

1. Hastedt J.E., Wright J.L. Percolative transport and cluster diffusion near and below the percolation of a Porous Polymeric matrix//Pharmaceutical research: vol. 23, No. 10, 2006.
2. Бекман И.Н. Мембраны в медицине, курс лекций, 2010.

С.А. БОРТНИКОВА

Научный руководитель – А.А. БЕЛОГОРЛОВ, к.ф.-м.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПОРИСТЫХ СРЕД

На основании предложенной методики восстановления пространственного распределения пор пористой среды по размерам планируется разработка аппаратно-программного комплекса для определения структуры пористых сред. Методика разработана на основе результатов исследования кинетики вытекания несмачивающей жидкости диспергированной в пористой среде. Такая характеристика крайне необходима для определения условий и области применения пористых сред.

В настоящее время пористые материалы используются во многих областях науки и техники: технологии очистки жидких и газообразных сред, материалы для хранения горючих и радиоактивных веществ, композитные материалы, биосовместимые структуры и т.д. Чтобы применять пористые среды в той или иной отрасли необходимо знать их характеристики: средний радиус, удельную площадь поверхности, плотность, удельный объем пор, а кроме того и пространственное распределение пор в материале, что является для многих процессов лимитирующим фактором.

В МИФИ на кафедре «Молекулярная физика» была разработана экспериментальная установка и методика, позволяющая исследовать пористые среды методом жидкостной порометрии. Данная установка позволяет исследовать кинетику вытекания несмачивающей жидкости из пористой среды после заполнения пористой среды несмачивающей жидкостью при различных температурах. Исследования показали, что по полученным экспериментальным данным, можно разработать методику восстановления пространственного распределения пор пористой среды по размерам.

Методика основывается на сравнении, восстановленных функций распределения пор по размерам, полученных через заданные интервалы времени при заданной температуре. В результате, получается функция распределения пор заполненных жидкостью после уменьшения избыточного давления до нуля в зависимости от времени ожидания. Основываясь на полученных функциях можно судить как о временах вытекания несмачивающей жидкости, так и о пространственном распределении пор в пористой среде. Предложенная методика позволяет определить характеристики пористых сред для дальнейшего их использования в различных областях индустрии.

М.Д. КАРАСЕВА

Научные руководители – Н.И. ЛАГУНЦОВ, к.ф.-м.н., доцент

И.М. КУРЧАТОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

ОАО «Аквасервис», Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ И ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Проведен анализ энергоэффективности двухступенчатого двухконтурного противоточного рециркуляционного каскада. Выбранная технологическая схема позволяет очищать и осушать природный газ с невысокими энергозатратами и высокой степенью извлечения метана.

При температурах и давлениях, создаваемых в процессе сжижения природного газа, образуется углеродный лед, если природный газ не очистить от углекислого газа. Углекислый газ плохо растворим в углеводородах, поэтому необходимо удалять CO_2 до уровня 100ppm. Для решения задачи очистки и осушки природного газа от CO_2 предложена технологическая мембранная схема, отличающаяся высокой энергоэффективностью и высокой степенью извлечения метана (основного компонента природного газа). Для оценки энергоэффективности использовались параметры новой отечественной полимерной мембраны, разработанной в РХТУ им. Менделеева.

Технологическая схема представляет собой двухступенчатый двухконтурный противоточный рециркуляционный каскад. Данная схема применяется для очистки от CO_2 , H_2S и He [1,2,3]. Первая ступень является одиночным делителем и осуществляет очистку метана от углекислого газа до заданного значения CO_2 в потоке продукта. Одной ступени очистки недостаточно, так как степень извлечения метана одиночного делителя не достигает 75%. Вторая ступень представляет собой рециркуляционный двухмодульный делитель, который позволяет достичь высокой степени извлечения метана (98% и выше).

Расчет технологической схемы проведен для бинарной смеси метана и углекислого газа (CH_4/CO_2). В рамках такого приближения метан является ценным компонентом (продуктом). Оценка эффективности проведена исходя из приведенных энергозатрат E [кВт*ч/кг] на работу межступенчатого компрессора в режиме адиабатического сжатия [].

Зависимость приведенных энергозатрат от степени извлечения метана ϕ показана на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что при степени извлечения метана в диапазоне от 98,0% до 99,4% энергозатраты не превышают значение $E=0,1\text{кВт}\cdot\text{ч/кг}$. Таким образом, двухступенчатый двухконтурный противоточный рециркуляционный каскад удовлетворяет поставленным требованиям с высокой эффективностью.

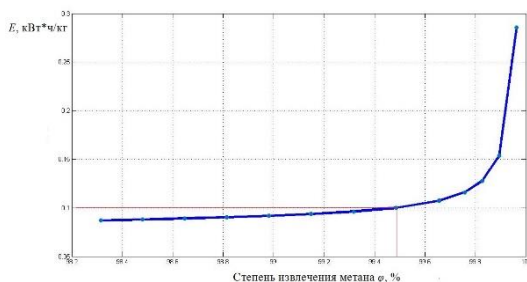


Рис.1. Зависимость приведенных энергозатрат от степени извлечения метана ϕ

В результате работы определены основные параметры технологической схемы для степени извлечения метана 99,4%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по договору №14.578.21.0106. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57815X0106.

Список литературы

1. Пат. 2012050816 США C10G31/09 , B01D61/58 Two(stage process for purifying a gas / Tom Snop, Shain(Jer Doong, David Farr, George K. Xomeritakis – опубл. 14.06.2012.
2. Лагунцов Н.И., Курчатов И.М., Карасева М.Д., Соломахин В.И. // Мембраны и мембранные технологии, 2014, том 4, №4. С.272-279
3. Соломахин В.И, Лагунцов Н.И., Курчатов И.М., и др. Патент RU № 150520 на полезную модель «Устройство извлечения гелия из природного газа повышенного давления» по заявке № 2014121148/05, от 26.05.2014, бюл. №5 от 20.02.2015
4. Циборовский Я. // Процессы химической технологии, 1958, стр. 531.

В.Н. ГУРКИН

Научный руководитель – Н.И. ЛАГУНЦОВ, к.ф.-м.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЦИКЛА В ГИБРИДНОЙ МЕМБРАННО-СОРБЦИОННОЙ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ПОМОЩИ ЭЖЕКТОРНОГО СМЕСИТЕЛЯ

Проведена оценка геометрических параметров эжектора для достижения наименьшей потери давления при смешивании потоков в гибридной системе.

Одна из наиболее эффективных систем, по обогащению газа целевым компонентом, является гибридная мембранно-сорбционная система. Данная установка включает в себя две ступени обогащения: сорбционную и мембранную с обратной связью в виде рецикла. В мембранной ступени поступающий газ разделяется на два потока: прошедший через мембрану поток пермеата и оставшаяся часть газа – поток ретентата.

Использование потока ретентата для организации рецикла целесообразно. Ведь данный поток, благодаря сорбционному блоку, обогащен целевым компонентом, по сравнению с исходным газом, и находится под давлением выше атмосферного. Однако проблема организации ее рецикла до сих пор окончательно не решена.

Основная проблема в том, что давление потока питания и потока ретентата различно. В силу того, что давление потока питания подобрано так, чтобы наиболее эффективно проходили процессы в обогащательных модулях установки, следует, что давление потока ретентата необходимо искусственно повысить до уровня питания.

Решить эту проблему можно несколькими способами. Существуют схемы, в которых давление рециркуляционного потока повышается при помощи компрессора. Однако такой способ весьма не экономичен. Второй компрессор – это и лишние затраты, как в электроэнергии, так и в установке, и увеличение габаритов самой установки. Более эффективным решением, на наш взгляд, является установка эжектора, который смешивал бы поток питания и поток ретентата. Расчеты показывают, что использование эжектора, как смесителя потоков, целесообразно и возможно подобрать такие его геометрические размеры, чтобы падение давления на выходе не сказывалось на обогащательные способности гибридной системы.

На основании теории эжекторов изложенной в пособии [1], были проведены расчеты эжектора: падение давления на выходе из эжектора в зависимости от диаметра сопел и его геометрические размеры.

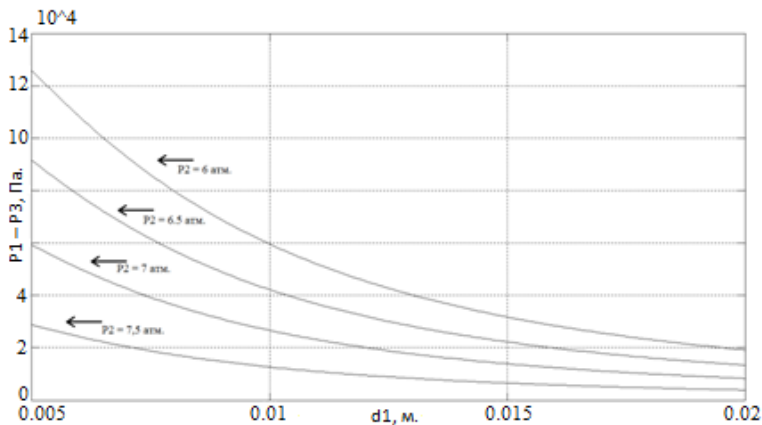


Рис. 1. График зависимости падения давления газа на выходе из эжектора от диаметра сопла высоконапорного потока

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ по соглашению № 14.579.21.0046.

Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57914X0046.

Список литературы

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н.Абрамович. – М.: Наука, 1976. 888 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ



Т.А. ОСИПОВА^{1,2}

Научный руководитель – В.А. УЗИКОВ²

¹Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ «МИФИ»

²ОАО «ГНЦ НИИАР», Дмитровград-10, Ульяновская обл.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕАКТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ

Приведены примеры экспериментальных устройств для облучения конструкционных материалов водо-водяных реакторов. Сообщается о возможности использования каналов ампульного типа с прогнозируемой естественной циркуляцией для проведения экспериментов по изучению свойств материалов при облучении.

Во многих странах мира проводятся реакторные исследования по радиационному материаловедению. В зависимости от целей и условий облучения разрабатываются типовые ампульные устройства или петлевые установки. К основным материаловедческим реакторам относятся Osiris (Франция), HANARO (Корея), LVR-15 (Чехия), HFR (Нидерланды), CM-3 (Россия).

На реакторе Osiris [1] разработаны типовые капсулы для облучения материалов в условиях, аналогичных условиям водяных реакторов. В этих устройствах (CHOUCA и IRMA) отсутствует принудительная циркуляция теплоносителя. Достижимые рабочие температуры облучения при этом составляют 250÷400 °С с неравномерностью по длине устройства ±5°С.

На высокопоточном реакторе HANARO для облучения неделящихся материалов разработана капсульная система [2], состоящая из самой капсулы, держателя, контролирующей и транспортной систем. Капсулы подразделяются на стандартные (рабочие температуры 250÷400°С), высокотемпературные (до 1000 °С) и низкотемпературные (ниже 100 °С).

Если к задачам эксперимента относится оценка воздействия водяного теплоносителя на свойства изучаемого материала, то такие исследования проводят в основном в петлевых установках, где теплоотвод от образцов осуществляется принудительной циркуляцией.

Так, например, на реакторе LVR-15 в петлевых установках RVS-3, RVS-4 [3] проводятся исследования по оценке механизма коррозионных повреждений в соответствии с типовыми условиями эксплуатации, в зависимости от уровня механических напряжений и состава водной среды. На реакторе HFR [4] строится петлевая установка для проведения испытаний на коррозионное растрескивание под напряжением материалов реакторов BWR, PWR и ВВЭР. Она позволит решить важный вопрос по представительности и количественной оценке влияния радиационного облучения на коррозионное растрескивание под напряжением.

В России, в АО «ГНЦ НИИАР» для проведения материаловедческих исследований при высоких параметрах водяного теплоносителя (рабочее давление до 18,5 МПа, температура теплоносителя 120–300 °С) используется высокотемпературная петля ВП-3 реактора СМ-3 [5].

В качестве альтернативы данной петли для решения задач по облучению материалов со сравнительно небольшим энерговыделением предложена конструкция ампульного канала [6], в котором теплоотвод от образцов осуществляется прогнозируемой естественной конвекцией. Организация заданного контура циркуляции осуществляется за счет использования разделителя потока внутри канала, а регулирование движущего напора – за счет выбора геометрических параметров контура циркуляции. Кроме того, выполнение корпуса канала в виде двухкорпусной конструкции позволяет изменять термическое сопротивление стенки канала, регулируя теплоотвод из него составом и давлением газа в полости между корпусами. Для данного канала разработана методика теплогидравлического расчета геометрических параметров, которая позволяет обеспечить заданные режимы охлаждения образцов в процессе облучения.

Список литературы

1. Sustaining Material Testing Capacity in France: From OSIRIS to JHR G.Bignan, D. Iracane, S. Loubière, C. Blandin CEA (France) IGORR 12 Conference -Beijing - October 2009.
2. Cho, M.-S., Choo, K.-N., Yang, S.-W. and Park, S.-J. (2014) Research on Material Irradiation in HANARO. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2, 855-861. <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2014.29096>
3. Jan KYSELA, Jakub PRAHL. Experimental Research Reactor LVR – 15. 12th IGORR, Beijing, P.R.China. 28th-31st Oct 2009.
4. Уникальные облучательные установки в реакторе HFR [Текст] /Л. Дебарберис ; пер. с англ. И.В. Семеновской, О.В. Анисимовой // Атомная техника за рубежом. 2013. № 2.
5. Опыт эксплуатации высокопоточного исследовательского реактора СМ /А.И. Звир, М.Н. Святкин, А.Л. Петелин //Материалы 11 ежегодного российского совещания «Безопасность исследовательских ядерных установок»: сб. докл. Димитровград: ГНЦ НИИАР, 2009.
6. Т.А. Осипова. Применение ампульного канала с естественной циркуляцией для внутриреакторных испытаний. 18-я Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «Молодежь и наука», г. Москва, 2014 г. <http://mn.mephi.ru/2014/articles/1110>. Дата обращения – 07.10.2015.

А.В. КОСМЫНЦЕВА¹

Научный руководитель – Д.К. ФОМИН², д.мед.н., профессор

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²ФГБУ "РНЦРР" Минздрава России, Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АППЛИКАТОРА ДЛЯ ВНУТРИПОЛОСТНОЙ БРАХИТЕРАПИИ ПЕЧЕНИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ Re^{188}

В проекте рассмотрена оптимизация конструкции аппликатора для внутриполостной брахитерапии печени при использовании Re^{188} с целью обеспечения равномерного дозового распределения, обеспечения необходимой поглощенной дозы в области локализации злокачественной ткани, соблюдения норм радиационной безопасности и, как следствие, проверки возможности применения прибора в медицине.

Рак печени является достаточно часто встречающимся онкологическим заболеванием брюшной полости[1]. На данный момент наиболее эффективным методом лечения является резекция печени. Однако в этом случае может возникнуть рецидив опухоли из-за остаточной злокачественной ткани, для препятствия возникновению этого процесса предлагается проводить внутреполостную брахитерапию печени, путем помещения аппликатора с радиоактивным препаратом в область возможной локализации остаточной ткани. Наиболее сложной задачей для реализации такой методики является выбор конструкции аппликатора и его параметров. На начальном этапе задача решалась с помощью математического моделирования.

Целью данной работы является определение оптимальных геометрических параметров аппликатора, требуемой активности радиопрепарата и времени облучения, необходимых для получения терапевтической дозы вблизи поверхности полости, оставшейся после резекции печени.

В МИФИ на кафедре «Медицинская физика» при участии сотрудников ФГБУ РНЦРР в рамках дипломного проекта был смоделирован аппликатор для внутриполостной брахитерапии печени при использовании Re^{188} . Для определения оптимальных параметров конструкции использовалась математическая модель аппликатора, разработанная в среде

GATE/Geant4[2]. Данная программная среда была создана для моделирования процессов переноса излучения в задачах медицинской диагностики и терапии, с использованием метода Монте-Карло. GATE (GEANT4 Application for Tomographic Emission) имеет в своем составе инструментарий для расчета дозовых распределений и характеристик полей рассеянного излучения при проведении лучевой терапии, и позволяет использовать библиотеки радионуклидов и материалов системы моделирования Geant4 (GEometry ANd Tracking).

В ходе работы над проектом были предложены различные варианты конструкции аппликатора, для каждой из которых с помощью моделирования определены их оптимальные параметры. Для дальнейшего развития проекта необходимо провести ряд экспериментов с различными конструкциями и их параметрами, на основании результатов которых можно будет выбрать наиболее соответствующие медицинским и техническим требованиям. При необходимости внести дополнительные изменения и снова проверить экспериментально.

Также с помощью модели было проверено соблюдение норм радиационной безопасности[3] для наиболее радиочувствительных органов, и на основании полученных результатов был сделан вывод о возможности применения предлагаемого аппликатора в медицине.

После выбора конструкции, для удобства подбора пользователем необходимых параметров аппликатора, следует написать приложение, позволяющее на основании заданных требований подбирать необходимые значения.

Поскольку на данный момент аналогичные технологии не применяются в медицине, то развитие предлагаемого проекта позволит существенно усовершенствовать существующие методики лечения рака печени, а также рассмотреть возможности его применения для других органов.

Список литературы

1. Борисов В.И. Гепатоцеллюлярный рак печени. Современные методы диагностики и лечения // "ЭФФЕКТИВНАЯ ФАРМАКОТЕРАПИЯ. Онкология, Гематология и Радиология" №3 | 2011
2. Users Guide V7.0 - GATE collaborative documentation wiki.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы //М: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Росмпотребнадзора, 2009

Э.Г. САДЫХОВ

Научный руководитель – Н.А. СЕМЕНОВА, д.б.н., гл.науч.сотр.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*Научно-исследовательский институт неотложной детской хирургии
и травматологии, Москва*

ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОТОНСОДЕРЖАЩИХ МЕТАБОЛИТОВ И ПАРАМЕТРОВ ДИФфуЗИИ В СТРУКТУРАХ ГОЛОВНОГО МОЗГА У ДЕТЕЙ С СОТРЯСЕНИЕМ ГОЛОВНОГО МОЗГА В ОСТРОМ ПЕРИОДЕ

Проведена оценка нарушений микроструктуры и метаболизма ткани головного мозга у детей с сотрясением головного мозга в остром посттравматическом периоде при помощи методов магнитного резонанса – диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии (ДТ МРТ) и протонной магнитно-резонансной спектроскопии (^1H -МРС).

В НИИ НДХиТ в отделении лучевой диагностики было проведено исследование влияния сотрясения головного мозга (СГМ) на обменные процессы и диффузию молекул воды в структурах головного мозга у детей в остром посттравматическом периоде (1 – 3 суток).

Известно, что при СГМ не обнаруживается нарушений в морфологии ткани мозга [1]. Это подтвердилось и в нашем исследовании. Стандартная МРТ не выявила очагов поражения ткани. Однако это вовсе не говорит об отсутствии нарушений в работе мозга. Известно, что СГМ, являющееся легкой черепно-мозговой травмой (ЧМТ), может вызывать отдаленные неврологические расстройства [2].

Для изучения посттравматического эффекта выбраны две морфологически разные структуры – таламус, представленный серым веществом, и мозолистое тело, образованное белым веществом.

Исследованы 16 пациентов с СГМ (средний возраст $12,6 \pm 2,6$ лет). По шкале комы Глазго (ШКГ) состояние пациентов оценивалось в 14 – 15 баллов. Группа нормы состояла из 8 человек (средний возраст $14,4 \pm 0,5$ лет). По данным T1 и T2-взвешенных МР изображений, видимых очагов поражения не выявлено.

Использовали магнитно-резонансный томограф Philips Achieva 3.0T с напряженностью магнитного поля 3 Тл и встроенным программным паке-

том ViewForum и 16-канальную приемную радиочастотную нейрососудистую катушку для головы.

Примененные в исследовании методы (ДТ МРТ и ^1H -МРС) дают уникальную информацию о микроструктуре и метаболизме головного мозга *in vivo*, которая необходима для повышения качества медицинской диагностики, контроля эффективности терапии, прогноза исхода травмы.

ДТ-изображения получены в аксиальной плоскости с использованием однокадровой спин-эхо эхо-планарной томографии (SS SE EPI). Для локализации чувствительного объема в методе ^1H -МРС использовалась импульсная последовательность PRESS.

По измеренным показателям ДТ МРТ, диффузия в левом таламусе у пациентов с СГМ увеличивается по сравнению с нормой, причем данный рост носит изотропный характер, что может говорить о возникновении локального внеклеточного отека в подкорковом сером веществе. Кроме того, установленные методом ^1H -МРС достоверные падение показателя NAA/Cr и повышение Cr/H₂O при статистически неизменных NAA/H₂O и Cho/H₂O в левом таламусе у пациентов могут свидетельствовать об активации синтеза креатина, т.е. происходит активация компенсаторных механизмов [3]. Установленная корреляционная связь между NAA и Cr позволяет предположить о взаимосвязи данных метаболитов и их одновременном участии в протекающих в нейронах метаболических процессах.

В белом веществе (колоне мозолистого тела) головного мозга пациентов наблюдается тренд к увеличению фракционной анизотропии (FA), продольной диффузии (AD) и тренд к уменьшению поперечной диффузии (RD) по сравнению с группой нормы. Данные изменения, вероятно, указывают на образование цитотоксического аксонального отека [4], при котором происходит перераспределение внутри- и внеклеточной воды. Снижение величин NAA/H₂O и Cho/H₂O, по нашему мнению, согласуется с полученными результатами по диффузии в колоне мозолистого тела.

Список литературы

1. Jordan B.D., Zimmerman R.D. Magnetic resonance imaging in amateur boxers. //Arch Neurol 1988; 45: 1207-1208.
2. Barlow K., Crawford S., Stevenson A. et al. Epidemiology of postconcussion syndrome in pediatric mild traumatic brain injury. //Pediatrics 2010; 374 – 81.
3. Семенова Н.А., Ахадов Т.А., Петряйкин А.В. и соавт. Нарушения метаболизма и взаимосвязь метаболических процессов в лобно-теменной коре мозга при тяжелой черепно-мозговой травме. Исследование методом локальной ^1H магнитно-резонансной спектроскопии. //Биохимия 2012; том 77, с. 493 – 500.
4. Wilde EA, McCauley SR, Hunter JV, et al. Diffusion tensor imaging of acute mild traumatic brain injury in adolescents. //Neurology 2008; 70: 948 – 55.

ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ТЕХНИКЕ



К.С. БИРЮКОВА

Научный руководитель – В.В. ЛЕБЕДЕВ, д.т.н., профессор

Московский авиационный институт (НИИУ)

ИЗМЕРИТЕЛЬ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛИЯНИЯ МЕРЦАНИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТА

Прибор для получения оперативной информации о здоровье, самочувствии и малейших изменениях пациента в процессе выполнения терапевтических процедур.

В последнее время в рефлексотерапии всё шире применяется метод измерения критической частоты слияния мерцаний – порога частоты, после которого глаз человека перестаёт воспринимать стробоскопический эффект. Этот порог индивидуален для каждого человека, но очень устойчив к внешним воздействиям. Изменение частотного порога происходит либо при очень сильном утомлении, либо при вредном воздействии на организм, в том числе лекарственных средств.

Актуальность заключается в новизне метода. А так же, повышение интереса медиков к быстрой и точной диагностике, не требующей большого количества сложной аппаратуры.

Новизна в том, что я предлагаю отказаться от микропроцессорных устройств и передать их функции малогабаритному персональному компьютеру для получения, хранения и обработки информации.

Результатом работы станет система, готовая для испытаний и использования в клинических лабораториях и иных подразделениях, занимающихся биологическими исследованиями.

Решение, предлагаемое мной, имеет следующие преимущества перед конкурентами: работа ведется со специалистами, которые непосредственно будут использовать систему, и будут выдавать требования для системы.

Аналоги, которые имеются в продаже обладают большими габаритами, не всегда поддерживают необходимые типы исследования, несут в себе множество неиспользуемых функций, которые напрямую влияют на стоимость оборудования.

Созданный прибор-стробоскоп на мультивибраторе повышенной стабильности с выдачей сигналов на светодиод, не нуждается в сложном программном обеспечении рабочего места - достаточно ноутбука.

Данный аппарат будет востребован во всех медицинских областях, особенно в рефлексотерапии. Этой работой интересуются так же для проверки состояния пилотов перед вылетом, спортсменов перед соревнованиями и т.п.

Список литературы

1. Дроботов В.Б., Бирюкова К.С. Новые возможности микросхем при нештатном питании // Материалы Международной школы-семинара «Физика в системе высшего и среднего образования России» / Под ред. Г.Г.Спирина. – Москва, Московский авиационный институт, АИР, июль 2012. – С.73-34.
2. Бирюкова К.С. Генерация пилообразного напряжения при нештатном питании микросхем // Сборник Тезисов Первой Всероссийской Интернет-конференции «Грани науки 2012». – Электронный ресурс. – ISSN 2227-8389 (CD-ROM). – Казань: 2012. – С. 222-223.
3. Бирюкова К.С. Передача информации частотной модуляцией пилообразной несущей частоты / Всероссийский межотраслевой молодёжный научно-технический форум «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики – 2012» // Конкурс научно-технических работ и проектов. Аннотации работ. – М.: Московский авиационный институт (НИУ) – ISBN 978-5-905176-15-9/ – С.70-71.
4. Бирюкова К.С. Новые возможности микросхем при нештатном питании / Всероссийский конкурс научных, образовательных и инновационных проектов студенческих научных обществ: сборник научных работ победителей конкурса. Ч. II / М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. – 280 с. – ISBN 978-5-7882-1304-0. – С.24-25.
5. Бирюкова К.С. Физика треугольных сигналов – теория и практика // Программа Всероссийского конкурса научных работ школьников «Юниор-2013, доклад №82. – М: НИЯУ МИФИ, февраль 2013. – Диплом 2-й степени призёра (будет в Общероссийской базе) и сертификат НИЯУ МИФИ участника конкурса научных работ школьников.
6. Бирюкова К.С. Передача информации частотной модуляцией треугольных сигналов // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» / Сборник тезисов докладов – М. ООО «Принт-салон»,: Московский авиационный институт (НИУ МАИ), 16-18 апреля 2013. – ISBN 978—5-905176-18-0. – С.205-206.
7. Бирюкова К.С. Частотный модулятор пилообразных импульсов с нештатной работой микросхемы // Первая Международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем". – М.: Московский институт радиотехники, электроники и автоматики (ТУ МИРЭА), 27 февраля – 1 марта 2013 г. – Сборник в печати, в Интернете опубликован на сайте mirea.ru.
8. Бирюкова К.С. Физика треугольных сигналов – теория и практика // Ежегодная внутривузовская конференция по итогам научно-исследовательских работ студентов / Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), факультет ПГСф (г. Мытищи Московской области), кафедра «Прикладная механика и математика». – Предпринт. – Сборник докладов. – Март 2013. – С.11-22.

И.В. КОЗЛОВ

Научные руководители – Г.Н. ЕЛМАНОВ, к.т.н., доцент

С.А. ГУДОШНИКОВ, к.ф.-м.н., в.н.с.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МИКРОПРОВОДОВ С ЭФФЕКТОМ ГИГАНТСКОГО МАГНИТНОГО ИМПЕДАНСА

Датчики на основе гигантского магнитного импеданса (ГМИ) могут использоваться для систем мониторинга и контроля, в магнитной дефектоскопии, в медицине, для систем позиционирования, в градиентометрах [1]. Источники магнитного поля в биологических системах (например, магнитные поля мозга и сердца человека) малы. Для их обнаружения необходимы датчики с высокой чувствительностью (1 пТл / 1 Гц), датчики на основе эффекта ГМИ – это идеальные кандидаты.

В настоящее время ведутся исследования в НИЯУ МИФИ на кафедре «Физических проблем материаловедения» совместно с кафедрой «Цветных металлов и золота» в НИТУ МИСиС при участии сотрудников НИЦ «Курчатовский институт».

Цель исследований – добиться значительного увеличения эффекта гигантского магнитного импеданса композиционных микропроводов и, как следствие, - увеличение чувствительности датчиков.

В ходе исследования предполагается выявить влияние структурного состояния на свойства композиционных микропроводов, разработать технологию, позволяющую получать композиционные микропровода с высокой чувствительностью и новым набором контролируемых свойств и параметров.

Исследуемые образцы изготавливаются методом Улитовского-Тейлора и представляют собой аморфные ферромагнитные микропровода диаметром порядка 15 мкм, покрытые стеклянной оболочкой. Возникает необходимость решать задачи, связанные с методами и режимами обработки. Однако четких представлений по согласованию структурных изменений и изменений магнитных свойств нет.

Превращения, происходящие при нагреве аморфных сплавов, можно разделить на два типа: структурную релаксацию и кристаллизацию. Одна-

ко, в реальных сплавах структурные изменения при нагреве весьма разнообразны, и их нельзя свести только к этим двум типам превращений.

Процесс релаксации напряжений связан с локальными перестройками атомов, что может приводить к реализации соответствующих видов магнитной анизотропии. Однако при таких режимах отжига кроме релаксации напряжений происходят процессы, связанные с выходом свободного объема из материала.

Применение отжига микропроводов в присутствии механических растягивающих и скручивающих напряжений под действием магнитного поля позволяет изменять магнитные свойства микропроводов (поле магнитной анизотропии и эффективную константу магнитного затухания), которые определяют чувствительность датчиков, основанных на эффекте ГМИ [2].

Было установлено, что термообработка в различных средах сильно влияет на свойства исследуемых образцов, контролируемый нагрев в инертной среде приводит к изотропности свойств по длине образца, увеличению ГМИ и снижению гистерезиса. Возникла необходимость отжига композиционных микропроводов в вакуумных системах.

В ходе исследования достигнуто увеличение ГМИ более чем в 2 раза, по сравнению с исходным образцом. В настоящее время ведутся исследования аморфных микропроводов применяя аналитические методы электронной микроскопии и рентгенодифракционного анализа.

Методами электронной микроскопии установлено, что уже во время формирования жилы и стеклянной оболочки происходит интенсивная миграция атомов: металл проникает в стекло, а неметаллы (Si, B, O) внедряются в металл.

На границе раздела возникает слой, переходный по составу - от металла к стеклу. Установлено, что ширина этого слоя в исследуемых образцах составляет порядка 10 нм. Данный слой может существенно влиять на эффект ГМИ.

Полученные в ходе исследования результаты развивают представления о магнито-импедансе и о влиянии термической обработки на свойства магнитомягких проводников.

Список литературы

1. Mohri K.T., Uchiyama T. Recent advances of micro magnetic sensors and sensing application // Sens. Act. 1997. V. 59, N 1–3. – P. 1–8.
2. Chen D.M., Xing D.W. Cryogenic Joule annealing induced large magnetic field response of Co-based microwires for GMI sensor applications // Journal of Applied Physics. 2014. 116, 053907. – P. 1–5.

И.С. СКОРОХОВ

Научный руководитель – А.Н. ТИХОМИРОВА, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УНИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В работе рассмотрены способы унификации интерфейсов взаимодействия электронных измерительных и регулирующих устройств, различающихся по типу и роли в сети, а также преимущества подобной унификации.

Унификация программного интерфейса различающихся электронных датчиков является крайне сложной задачей с точки зрения проектирования, так как она имеет множество скрытых рисков. Но при этом она является крайне выгодной, так как единообразная форма взаимодействия любого датчика сети позволит снизить затраты на его первичную настройку и эксплуатацию.

Основной задачей в данной работе является объединение множества разнородных электронных устройств в единую сеть без необходимости разработки программной поддержки каждой группы датчиков.

В результате исследования проблемы были выявлены признаки и свойства, при объединении которых в единую сущность появляется возможность абстрагироваться от датчика при взаимодействии с ним. К таким свойствам были отнесены MIME-типы посылаемых электронными устройствами сигналов и схемы их обработки [1]. Подобное абстрагирование позволяет принимать от электронного устройства информацию и посылать на него команды независимо от его типа и роли в системе.

При этом полностью избавиться от необходимости формализации входных и выходных данных невозможно, что проявляется на этапе визуализации информации, поступающей с датчика. Но проделанная работа дает почву для внедрения систем машинного обучения, которые позволят обойти подобную проблему.

Список литературы

1. Руководство по технологиям объединенных сетей. 4-е изд. — М.: Вильямс, 2005. ISBN 5-8459-0787-X.

А.А. СКВОРЦОВА

Научный руководитель – В.В. ЛЕБЕДЕВ, д.т.н., с.н.с.

Московский авиационный институт (НИИ)

ФИЗИКА ШАГА В РЕФЛЕКТОРНОМ ТРЕНАЖЁРЕ

Созданы приборы, упрощающие работу врача по диагностике и лечению заболеваний, так как повышается интерес медиков к быстрой и точной проверке состояния пациента, не требующей большого количества аппаратуры.

Знал ли П.Л.Чебышёв, что его стопоходящая машина, показанная на Всемирной выставке в Париже в 1878 году, содержит в себе информацию из глубокой подкорковой области человека [1,2]? Шагающие механизмы перспективны для тяжёлых транспортных средств и для малопрочных грунтов, особенно для тундры, Арктики и шельфовых областей. Однако шагающие механизмы привлекают внимание не только инженеров, но и врачей, нейрофизиологов, учителей специальных коррекционных школ, особенно VI, III, IV и даже VIII вида [3,4,5]. *Цель работы* - вызвать безусловный двигательный рефлекс из подкорки мозга больного с нарушениями опорно-двигательного аппарата с помощью специального тренажёра, который напугает человека о природной траектории движения стопы.

В подкорке есть природная траектория стопы, потому что она появилась очень рано, раньше, чем человек встал на две ноги. Техника шага мамонтов и динозавров ничем не отличается от техники шага человека. Надо создать устройство, которое поможет больному человеку вспомнить эту природную траекторию с древней историей и оптимальной физикой шага. Аналоги тренажёра для мышц не активизируют подкорку [3].

Нейрофизиологическая основа тренажёра приведена в книге [1]. На ранних стадиях эволюции, когда понятия о человеке ещё не существовало, когда кора головного мозга не была развита, основным двигательным центром была только область стрио-паллидум. Развитие головного мозга и его коры подчинило себе стрио-паллидум. С нейрофизиологической точки зрения важен факт существования диффузных, неорганизованных движений в паллидуме и более организованных движений в стриатуме. *Техническая задача* заключается в извлечении стрио-паллидарных движений из подкорки головного мозга пациента, запоминание их корой, отра-

ботка и восстановление полноценной функции движения [6,7,8]. *Термодинамическая основа шагающих механизмов в медицине* заключается в анализе КПД человека. Кора головного мозга обнаружила, что у теплокровных организмов КПД маленький, механической энергии мало, её надо экономить. Для человека КПД Карно не превосходит 5%, а реальный КПД на порядок меньше. Кора головного мозга дополнила, но ни в коем случае не исключила подкорковые безусловные двигательные рефлексы.

Информационная основа шагающих механизмов для медицины.

Тренажёр подобен самообучающейся нейронной сети с учителем. Сеть – это пациент, у которого нарушены движения, но сохранены какие-то участки мозга и проводящих путей-нейронов для восстановления правильного движения ног. Учитель – это тренажёр, который постоянно и многократно подаёт на вход нейронам правильный сигнал – природную траекторию стопы. Выход – это нога человека. Если нога начала правильно двигаться, то система самообучилась, больной выздоровел.

На защиту выносится механический макет рефлекторного тренажёра, построенный на основе комбинации лямбдаобразных механизмов с параллелограммами П.Л.Чебышева [9,10]. Предлагаемый механизм имеет одну степень свободы.

Список литературы

1. Бадалян Л.О. Невропатология. – М.: Просвещение, 1982.
2. Астапов В.М., Микадзе Ю.В. Атлас нервной системы человека. Строения и нарушения. – Изд. 8-е, переработанное и дополненное. – М.: PerSe, 2011.
3. Электронный ресурс: http://www.blago.ru/want_to_help/
4. Сворцова А.А., Папиашвили Э.Д. Физика шагающих и цепляющих механизмов // 18-я Международная телекоммуникационная конференция молодых учёных и студентов «Молодёжь и наука». – М.: НИЯУ МИФИ, октябрь 2014 – февраль 2015. – Эл. ресурс <http://mn.mephi.ru/articles/1189>
5. Папиашвили Э.Д., Сворцова А.А. Шельфовый шагочод. Четвёртая машина. – МАКС-2015. - Электронный ресурс: https://youtu.be/cVx_F5zEj9o
6. Сворцова А.А., Папиашвили Э.Д. Механизм для рефлекторного тренажёра. Электронный ресурс: <https://youtu.be/Umfpg9ykYGQ>
7. Сворцова А.А., Папиашвили Э.Д. Рефлекторный тренажёр для реабилитации опорно-двигательного аппарата человека // Материалы 9-го Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах». – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 27-30 октября 10.2015.
8. Сворцова А.А., Папиашвили Э.Д. Рефлекторный реабилитационный шагающий тренажёр // I Международная школа-конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина материалы и технологии XXI века» - Казань, К(П)ФУ, 23-28 ноября 2015 г. – Эл. ресурс: http://media.wix.com/ugd/14a693_af4a65c736034fffa459328ef1522fad.pdf
9. Сворцова А.А. Шагающие механизмы в медицине // Приволжский конкурс РОСТ-SEF научных работ школьников. – Нижний Новгород, 5-8 ноября 2015. – Эл. ресурс: <http://www.rostsef.ru/news/43>

В.В. ФЛОРЕНЦЕВ

Научный руководитель – Р.О. РЕЗАЕВ, к.ф.-м.н.

ООО «Кадегис», резидент инновационного центра СКОЛКОВО, Москва

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЗАПЯСТНЫЙ БРАСЛЕТ-ХОЛТЕР HGAZER

Большинство людей стремится к регулярному контролю жизненно важных показателей самочувствия, таких как артериальное давление, сердечный ритм, мониторинг физической активности и другие. В помощь таким людям зарубежные компании STBL Medical Research AG [1], Bmed, Beurer [2], OMRON [3] и GARMIN предлагают на рынке свои продукты: многофункциональные браслеты, выполненные в форме наручных часов. Однако функциональность предлагаемых решений недостаточна для исчерпывающего контроля за самочувствием покупателя. Например, некоторые приборы могут осуществлять только контроль пульса, другие – измерение артериального давления, третьи могут только фиксировать сведения о количестве пройденных шагов и так далее.

Наша команда предлагает расширить возможности рынка многофункциональных браслетов для их использования в медицинских целях. Пульсометр, тонометр, шагомер, суточное мониторирование кардиограммы (холтер), система измерения температуры и влажности кожных покровов, датчик температуры и давления воздуха окружающей среды, данные о беге, езде на велосипеде, плавании и GPS – перечень функций, которые мы предлагаем интегрировать в единое устройство: многофункциональный браслет HGazer.

Предполагаемый внешний вид устройства проиллюстрирован на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид HGazer

Система способна автоматически выявлять нарушения в работе сердца, сопоставляя полученные данные с заранее запрограммированными пределами, а также рассчитывать статистические характеристики.

HGazer выполнен в виде браслета и удобно прилегает к руке. В корпус прибора вмонтирован активный оптический сенсор, позволяющий контролировать пульс, а также измерять уровень кислорода в крови по интенсивности отражения от кровяных клеток излучения с различными длинами волн. На корпусе имеется встроенный датчик температуры и влажности кожных покровов.

Устройство также снабжено датчиком температуры и давления воздуха окружающей среды, датчиками движения и контроля положения. Информация о состоянии обследуемого может поступать как на основной дисплей прибора, так и на считывающие устройства, подключенные к ПК.

Основной идеей устройства является:

- отсутствие большого числа проводов для мониторинга ЭКГ и применение современного датчика детализации PQRST-области PS25251 EPIC UNI ECG Sensor;
- отсутствие электромотора-нагнетателя воздуха в воздушный мешок-манжету, как и отсутствие самого мешка, делающих привычные запястные тонометры крупногабаритными, неудобными в повседневном ношении и потребляющими чрезмерный уровень заряда батареи. Предлагается альтернативное решение: компактная «дышащая» силиконовая манжета с каналами, наполненными жидкостью, давление в которые нагнетается пьезокерамическими толкателями. Это делает данную систему привлекательной не только с точки зрения энергопотребления и отсутствия какого-либо шума, но и с точки зрения компактности.

Применение двух элементов, описанных выше, отличают систему от всех существующих аналогов на рынке и позволяют ей сосуществовать сразу в двух классах: носимая электроника (гаджет интернета-вещей) и медицинское оборудование.

Список литературы

1. Популярная механика. Часы-тонометр: непрерывный мониторинг [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.popmech.ru/technologies/14314-chasy-tonometr-nepreryvnyy-monitoring/>.— (Дата обращения: 15.07.2015).
2. Официальный представитель Beurer [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://beurer.tv/catalog/tonometr-beurer-bc58.html>.—(Дата обращения: 14.07.2015).
3. RHARMEX MARKET [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://pharmex-market.ru/market/tonometry/avtomaticheskie_na_zapyaste/.—(Дата обращения: 16.07.2015).

М.Х. АШИККАЛИЕВА, Е.В. ПОЛЯКОВ

Научный руководитель – В.Г. НИКИТАЕВ, д.т.н, профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ БЛАСТНЫХ КЛЕТОК НА ПРЕПАРАТАХ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ И АСПИРАТАХ КОСТНОГО МОЗГА ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ОСТРЫХ ЛЕЙКОЗОВ

В данной работе представлена актуальная значимость исследования острых лейкозов. Показано применение разработанной методики для выявления в анализируемых препаратах периферической крови или аспиратах костного мозга типов бластных клеток.

В настоящее время сложность исследования заключается в выявлении бластных (незрелые клетки костного мозга) клеток на препаратах периферической крови и аспиратах костного мозга. Остаются нерешенными проблемы оценки количественного состава аспиратов костного мозга, показателей содержания лимфоцитов в норме [1].

Исследование острых лейкозов занимает важное место в онкологической диагностике. Лейкемия (острый лейкоз) - это злокачественная опухоль системы крови, которая характеризуется тяжелым состоянием пациента, септическими осложнениями. Стоит заметить, что диагноз острого лейкоза может быть поставлен в двух случаях. Во-первых, наличие бластных клеток в периферической крови свидетельствует о вероятности заболевания острого лейкоза. Во-вторых, скопление 25-30% бластных клеток в костном мозге подтверждает точную заболеваемость пациента острым лейкозом.

Заболевание начинается с появлением слабости в организме, недомогания, подъёма температуры тела с возможным одновременным развитием ангины. Острый лейкоз также обусловлен выраженной формой анемии или геморрагическим диатезом, для которого свойственны подкожные или слизистые кровоизлияния. При осмотре пациента, обнаруживают увеличение лимфоузлов, печени и селезёнки.

Наличие бластных клеток характеризуется морфологическим анализом костного мозга. Образцы клеток изучаются врачом-патологоанатомом с использованием оптического микроскопа, для определения типа острого лейкоза. Предложенная классификация очень важно, так как она определяет лечение назначенное пациенту. Иногда

сведения могут быть ошибочные, правильно поставленный диагноз зависит от опыта врача и трудностью определить тип или же подтип острого лейкоза.

В научной практике проблема исследования информативных признаков клеток с препаратов периферической крови и аспиратов костного мозга является недостаточно исследованной.

Методика проведения эксперимента заключается в выделении клеток, расчете характеристик исследуемых клеток, поиске наилучших признаков для классификации с наименьшей ошибкой (признаки: текстурный, спектральный, геометрический, морфологический), а также классификации полученных результатов между типами лейкозов. Работа выполняется при помощи оптического микроскопа АТЛАНТ.

Полученные результаты показали что, при выявлении в анализируемом препарате периферической крови или аспирате костного мозга бластных клеток, в зависимости от их типа в некоторых случаях можно сделать предположительное заключение о типе острого лейкоза, и система показывает возможные варианты диагнозов при обнаружении в образце представленных типов бластных клеток. При этом диагноз острого лейкоза врач-гематолог устанавливает лишь по результатам дополнительных исследований, перечень которых определяется на основании имеющихся клинических данных.

Сегодня в медицинской практике причины развития острых лейкозов малоизвестны. Выделяют факторы, повышающие риск развития заболевания: наследственность, заболевания иммунной системы, воздействие высоких доз радиации и химических веществ, которые подавляют костномозговое кроветворение.

Список литературы

- 1) Френкель М.А. Исследование костного мозга в онкологии // Иммунология гемопоза. 2014. Т. 12. № 1-2. С. 18-41.

А.О. БЫКОВ

Научные руководители – З.А. КОКОВ, к.ф.-м.н., доцент

С.Л. ЩЕРБИН, к.биол.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО СКОЛИОЗА

Основной целью проекта является внедрение в лечебно-диагностический и образовательный процесс лечебно-профилактических, санаторно-курортных, спортивных, образовательных и других профильных учреждений новых авторских технологий комплексной диагностики и лечения нарушений опорно-двигательной системы человека в виде статического сколиоза позвоночника, полномасштабная практическая реализация которых позволит кардинально (до 2-х и более раз) снизить критический уровень распространенности данного заболевания.

В МИФИ, на кафедре «Экспериментальной ядерной физики и космофизики» при участии сотрудников КБГУ и СЕВКАВРЕНТГЕНА был разработан и изготовлен оригинальный программно-аппаратный комплекс «Миотест-Симметрия» для фундаментальных исследований, диагностики (в том числе скрининговой экспресс-диагностики) и коррекции нарушений двигательного стереотипа (статического сколиоза) на самых ранних стадиях их развития у детей и взрослых. Необходимость реализации предлагаемого проекта обусловлена чрезвычайно высокой распространенностью среди всех слоев населения России статического сколиоза позвоночника, заболевания приводящего к ухудшению качества жизни, который косметологически уродует тело человека и нарушает работу его внутренних органов. На сегодня в мире функциональный сколиоз и нарушения осанки (боли в спине) наблюдаются во всех возрастных группах и у детей достигает 92%, а у взрослых от 70 до 90%.

Главная инновационная идея, лежащая в основе предлагаемого проекта, заключается в создании на основе разработанных авторами новых функциональных критериев нормы и патологии двигательного стереотипа человека «Миотест-Симметрия».

Список литературы

1. Вейн А.М., Авруцкий М.Я. Боль и обезболивание. М.: Медицина, 1997, 277 с.
2. Гэйли Р.Л., Спайт Д.У., Симон Р.Р. Неотложная ортопедия. Позвоночник.- М.: Медицина, 1995.- 428 с.
3. Левит К., Захсе Й., Янда В. Мануальная медицина. Пер. с нем.- М.: Медицина, 1993.- С. 59-60, 68-70, 75-76, 129-137.

Ю.А. МЕЛЬНИКОВА

Научный руководитель – О.Л. МОРОЗОВА, д.мед.н., профессор

Первый московский государственный медицинский университет

им. И.М. Сеченова Минздрава России

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИПОКСИЧЕСКОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОЧЕК

В данной работе предлагается инновационный способ прогнозирования ишемически-гипоксического повреждения почек. В основе способа лежит математическая модель корреляции изменения уровней биомаркеров гипоксии (VEGF, HIF-1) и степенью повреждения почечной ткани.

Лидирующее место среди социально значимой патологии занимает хроническая болезнь почек (ХБП). ХБП имеет разнообразные причины возникновения, приводящие к кислородному голоданию почечной паренхимы. ХБП нередко начинается в раннем детском возрасте, неуклонно прогрессирует, требует дорогостоящей заместительной терапии и приводит к тяжелой инвалидизации пациентов [1]. Именно поэтому в клинической практике особенно востребованы высокочувствительные, малоинвазивные методы ранней диагностики и прогнозирования течения, а также профилактики ХБП.

В настоящее время диагностика ХБП основана на установлении снижения скорости клубочковой фильтрации, когда 50% почечной паренхимы погибло. На данной стадии ХБП перед клиницистами стоит задача замедлить прогрессирование гибели нефронов, удлинить срок додиализного периода и тяжелой инвалидизации пациента. Далее больному будет показана трансплантация почки, а в «листе ожидания» пересадки почки состоит 10 тысяч человек, при 1,5 тысячах трансплантаций почек в России в год.

Разработка инновационных методов ранней диагностики гипоксического повреждения почек на начальном этапе позволит начать нефропротективное лечение на этапе обратимых изменений, проводить объективный мониторинг и оценивать эффективность проводимого лечения, персонализировать тактику ведения пациента.

В настоящее время молекулярные маркеры в широкой клинической практике не используются в связи с отсутствием четких моделей их динамики в норме и при патологии [2].

В нашем проекте впервые будет получена математическая модель, позволяющая на основе изменения уровня биомаркеров оценивать степень гипоксического повреждения почек и прогнозировать течение заболевания, благодаря чему впервые станет возможным обнаружение обратимых или возможных повреждений почечной ткани на молекулярном уровне (на доклиническом этапе).

Способ прогнозирования будет реализован в виде компьютерной программы, в основу которой положена математическая модель корреляции изменения уровней биомаркеров гипоксии (васкуло-эндотелиальный фактор роста – VEGF, гипоксией индуцируемый фактор-1 – HIF-1) и степенью структурных изменений почечной ткани.

Используя введенные пользователем значения уровней биомаркеров, определенных в пробе мочи, а также выставленный временной интервал, программа рассчитает и предоставит прогноз состояния почек в интересующий момент времени.

Нами было проведено пилотное исследование динамики содержания VEGF у новорожденных детей с гипоксией почек и подтверждено увеличение его концентрации до клинических проявлений почечной недостаточности. В экспериментальном исследовании на модели гипоксии почек у новорожденных крыс нами доказано, что увеличение содержания VEGF коррелирует со степенью структурных изменений в почках.

Разрабатываемый нами способ позволит диагностировать ХБП на начальном этапе до клинических проявлений, планировать тактику ведения пациентов на основании точного прогноза повреждения почек, избежать необходимости применения дорогостоящих методов лечения (гемодиализа и трансплантации почек) и тяжелой инвалидизации пациентов.

Реализация данного проекта откроет новые ориентиры для дальнейшего создания технологий ранней диагностики, персонализированного лечения и профилактики ХБП.

Список литературы

1. А.В. Смирнов, Е.М. Шилов, В.А. Добронравов, И.Г. Каюков и др /Национальные рекомендации. Хроническая болезнь почек: основные принципы скрининга, диагностики, профилактики и подходы к лечению / 2012
2. Л.И. Уразаева, А.Н. Максудова / Биомаркеры раннего повреждения почек: обзор литературы / Практическая медицина, 2014, 4(80), том 1

РАДИАЦИОННО-СТОЙКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

С.М. ВИНОГРАДОВ

Научный руководитель – Э.В. АТКИН, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КОЛЬЦЕВОЙ ГЕНЕРАТОР НА ПАРАМЕТРИЗИРУЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ N-КАНАЛЬНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Описан вариант исполнения кольцевого генератора на параметризируемых p-канальных кольцевых транзисторах, для обеспечения повышения радиационной стойкости.

КМОП интегральные схемы широко используются во многих областях с повышенными требованиями к радиационной стойкости. В подобных условиях, ионизационное излучение может вызвать различные дефекты кристаллической решётки, что может привести к полному нарушению работы интегрального блока или даже всей схемы. Наиболее подвержены данным эффектам N-канальные транзисторы [1]. Наиболее распространенным решением борьбы со сбоями в работе, является использование охранных колец в сочетании с кольцевой топологией затворов N-канальных транзисторов.

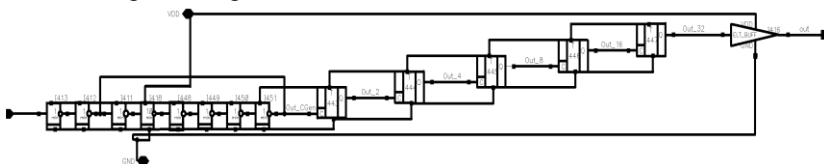


Рис. 1. Схема кольцевого генератора на кольцевых транзисторах

В основе схемы лежит кольцевой генератор с 5-ю делителями частоты на Т-триггерах и выходным буфером (рис.1). Все элементы выполнены на кольцевых транзисторах в сочетании с охранными кольцами.

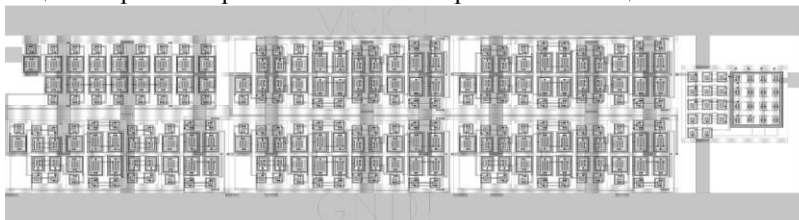


Рис. 2. Топология кольцевого генератора на кольцевых транзисторах

Конфигурация схемы была подобрана таким образом, чтобы кольцевой генератор работал на внешнюю нагрузку в $5pF$ с частотой в $31,25$ МГц, соответствующей $1ГГц$ на выходе кольцевого генератора. Топологическое исполнение схемы показано на рис.2.

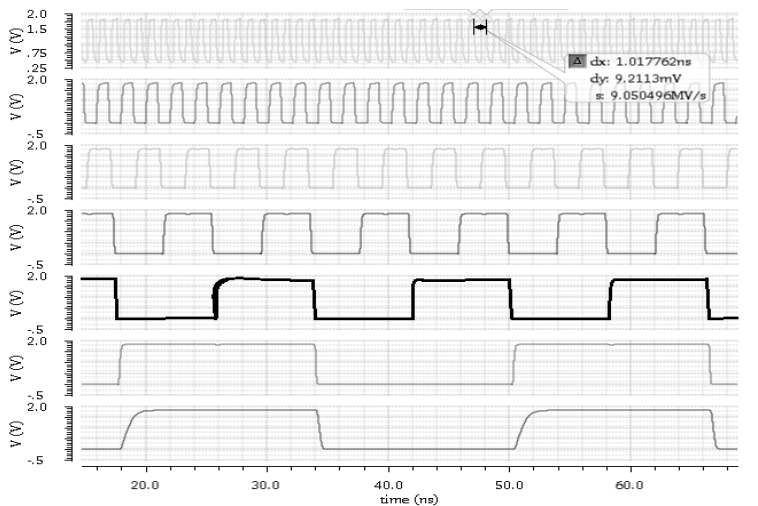


Рис. 3. Результаты моделирования

Результаты электронного SPICE моделирования, проведённого в САПР CADENCE на технологических библиотеках компании UMC для 180 нм, показаны на рис.3. На рисунке изображены сверху в низ: выходная частота кольцевого генератора; выходные частоты 5-ти последовательно подключенных делителей частоты; частота на выходе всей схемы.

Таким образом, в статье описан вариант исполнения кольцевого генератора на параметризуемых n-канальных кольцевых транзисторах, для обеспечения повышения радиационной стойкости.

Список литературы

1. K. Kloukinas, F. Faccio, A. Marchioro, P. Moreira "Development of a Radiation Tolerant 2.0 V standard cell library using a commercial deep submicron CMOS technology for the LHC experiments.", CERN/EP-MIC, CH1211, Geneve 23, Switzerland
2. Виноградов С.М., Аткин Э.В., Иванов П.Ю. "Creating a parameterized model of a CMOS transistor with a gate of enclosed layout", Journal of Physics: Conference Series 2015

С.М. ВИНОГРАДОВ

Научный руководитель – Э.В. АТКИН, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗВИТИЕ ЦИФРОВОЙ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОЙ БИБЛИОТЕКИ НА ПАРАМЕТРИЗИРУЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ N-КАНАЛЬНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Описан вариант радиационно-стойкого топологического исполнения на параметризуемых n-канальных кольцевых транзисторах логических элементов «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ», а так же цифрового выходного буфера из технологической библиотеки компании UMC для 180 нм.

КМОП интегральные схемы широко используются во многих областях с повышенными требованиями к радиационной стойкости. В подобных условиях, ионизационное излучение часто вызывает различные дефекты кристаллической решётки, что может привести как к нарушению работы отдельного интегрального блока, так и к отказу всей схемы.

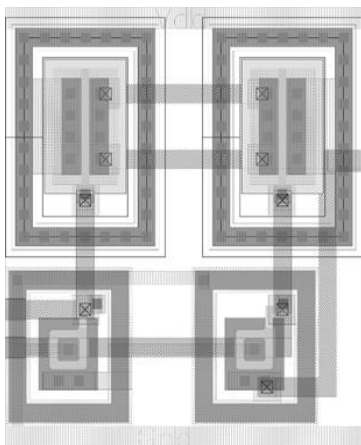


Рис.1. Топологическое представление схемы «И-НЕ»

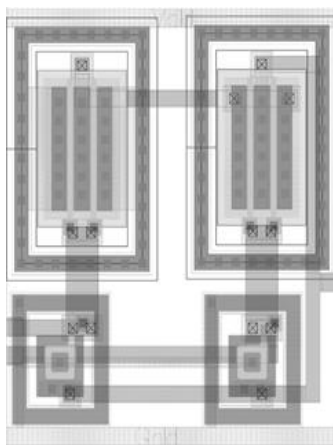


Рис.2. Топологическое представление схемы «ИЛИ-НЕ»

Наиболее распространенным решением борьбы со сбоями в работе КМОП интегральных схем, вызванными жестким ионизационным излу-

чением, является использование охранных колец в сочетании с кольцевой топологией затворов N-канальных транзисторов [1].

В данной статье, предлагается вариант радиационно-стойкой топологической реализации некоторых стандартных элементов цифровой библиотеки компании UMC для 180 нм, таких как: цифровой выходной буфер BUF12СК, а также логических элементов «2И-НЕ» и «2ИЛИ-НЕ» с использованием n-канальных транзисторов с кольцевой топологией и охранными кольцами.

За основу были взяты стандартные схемы цифровой библиотеки, с заменой n-канальных транзисторов на кольцевые. Далее, при помощи стандартных программных средств САПР Virtuoso IC v. 6.1.5 и охранных колец, были построены топологии, представленные на Рис.1-3.

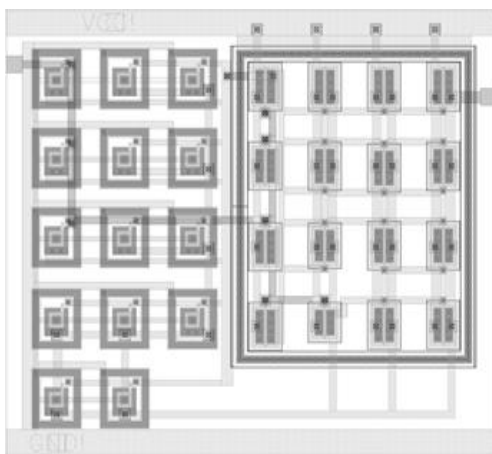


Рис.3. Топологическое представление схемы выходного буфера

Таким образом, в статье описан вариант радиационно-стойкого топологического исполнения на параметризуемых n-канальных кольцевых транзисторах логических элементов «2И-НЕ», «2ИЛИ-НЕ», а так же цифрового выходного буфера из технологической библиотеки компании UMC для 180 нм.

Список литературы

1. Виноградов С.М., Аткин Э.В., Иванов П.Ю. "Creating a parameterized model of a CMOS transistor with a gate of enclosed layout", Journal of Physics: Conference Series 2015

С.М. ВИНОГРАДОВ

Научный руководитель – Э.В. АТКИН, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СИНХРОННЫЙ Т-ТРИГГЕР НА ПАРАМЕТРИЗИРУЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ N-КАНАЛЬНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Описан вариант исполнения синхронного Т-триггера на параметризуемых n-канальных кольцевых транзисторах, для обеспечения повышения радиационной стойкости.

Зачастую, современная электроника вынуждена работать в условиях повышенного радиационного фона, для обеспечения нужд физики элементарных частиц, космоса и военной промышленности.

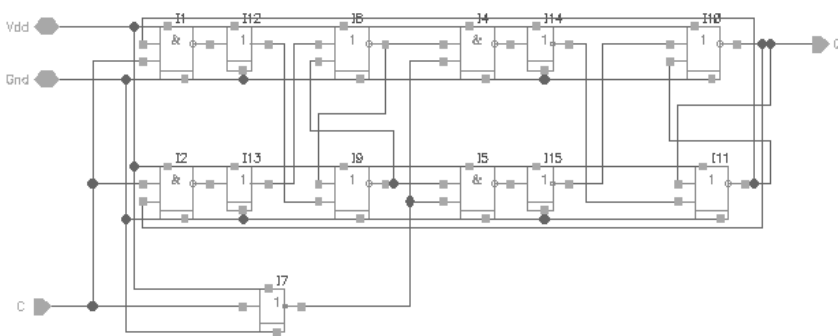


Рис.1. Схема синхронного Т-триггера

Наиболее распространенным решением борьбы со сбоями в работе КМОП интегральных цифровых схем, вызванными жестким ионизирующим излучением, является использование различных методов шифрования с контрольными суммами и троированием элементов схемы. Однако, использование традиционных методов не всегда приносит должный результат, по этому иногда прибегают к альтернативным топологическим методам повышения радиационной стойкости [1].

В данной статье предлагается вариант топологической реализации синхронного Т-триггера с использованием охранных колец и n-канальных транзисторов с кольцевой топологией затвора [2].

За основы была взята стандартная схема синхронного Т-триггера, представленная на Рис.1. Далее, при помощи стандартных программных средств САПР Virtuoso IC v. 6.1.5, использовании охранных колец и замены полосковых п-канальных транзисторов на параметризируемые с кольцевым затвором, была построена топология, представленная на Рис.2

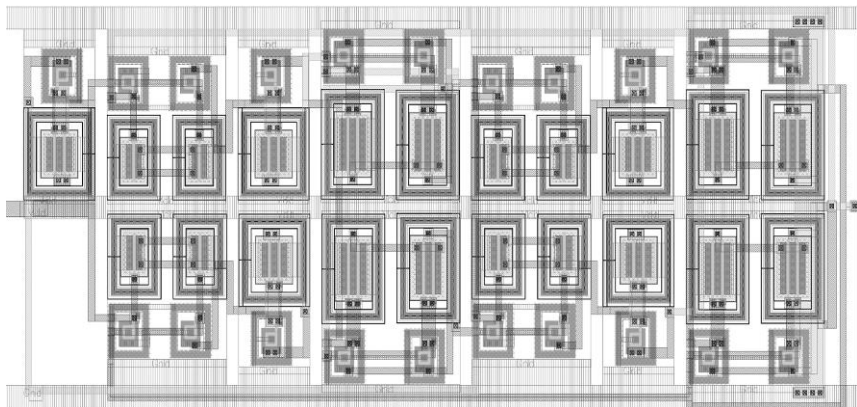


Рис.2. Топологическое представление схемы синхронного Т-триггера

Полученная топология отличается повышенной радиационной стойкостью по отношению к стандартной реализации благодаря тому, что охранные кольца блокируют возможный ток утечки между рядом стоящими транзисторами, а кольцевой затвор блокирует возможный ток утечки между стоком и истоком п-канальных транзисторов, обычно приводящий как к отказу одного транзистора, так и всего блока.

Таким образом, в статье описан вариант исполнения синхронного Т-триггера на параметризуемых п-канальных кольцевых транзисторах, для обеспечения повышения радиационной стойкости.

Список литературы

1. K. Kloukinas, F. Faccio, A. Marchioro, P. Moreira "Development of a Radiation Tolerant 2.0 V standard cell library using a commercial deep submicron CMOS technology for the LHC experiments.", CERN/EP-MIC, CH1211, Geneve 23, Switzerland.
2. Виноградов С.М., Аткин Э.В., Иванов П.Ю. "Creating a parameterized model of a CMOS transistor with a gate of enclosed layout", Journal of Physics: Conference Series 2015.

В.В. РАЗУМНЫЙ, М.И. ГАРАФУТДИНОВ

Научный руководитель – Г.И. ЗЕБРЕВ, профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ СБОЕВ ЯЧЕЕК ПАМЯТИ ОТ ПРЯМОЙ ИОНИЗАЦИИ ПРОТОНАМИ

Продемонстрирован метод расчета сечения и интенсивности сбоев в условиях космического пространства за счет прямой ионизации от низкоэнергетических протонов в схемах памяти с технологическими нормами менее 100 нм.

Сбои от протонов в цифровых схемах памяти невысокой степени интеграции происходит, главным образом, за счет продуктов ядерных реакций или непосредственного взаимодействия протонов с атомами кремния (ядер отдачи). Сечения сбоев пропорциональны сечениям ядерных взаимодействий, которые являются растущими функциями энергии протонов с насыщением, наступающим при энергиях протонов $\sim 30 - 50$ МэВ. Типичные значения сечений сбоев в насыщении находятся в диапазоне $10^{-12} - 10^{-14}$ см², что на 5 - 6 порядков меньше, чем сечение сбоев за счет прямой ионизации тяжелыми заряженными частицами (ТЗЧ), которое в области насыщения обычно порядка геометрических размеров ячейки памяти. Значения линейной передачи энергии от протонов во всем диапазоне их энергий заметно меньше чем 1 МэВ-см²/мг. Поэтому для старых схем памяти относительно невысокой степени интеграции с критическими зарядами ~ 10 фКл и больше прямая ионизация от протонов не способна вызвать переключения ячеек памяти. За последние десять лет ситуация кардинально изменилась. Современные схемы памяти с технологическими нормами менее 100 нм имеют характерные значения критического заряда порядка 1 фКл и менее. Для таких схем памяти низкоэнергетические протоны (с энергиями менее 1-2 МэВ) способны обеспечить энерговыделение, достаточное для переключения одной ячейки памяти (Single Bit Upset, SBU). Действительно, такого рода сбои при облучении протонами низкой энергии неоднократно наблюдались экспериментально за последние годы [1]. Прямым указанием на то, что эти сбои были обусловлены прямой ионизацией от протонов, является увеличение сечения сбоев на 3-4 порядка при уменьшении энергии протонов $\mathcal{E}_p$ до 1 МэВ и менее. Интенсивность сбоев за счет прямой ионизации протонами можно вычислить по формуле [2]

$$R = \int d\varepsilon_p \phi(\varepsilon_p) \sigma^{DI}(\varepsilon_p), \quad (1)$$

где $\phi(\varepsilon_p)$ - распределение потоков протонов по энергии. Сечение сбоев от прямой ионизации вычисляется по формуле

$$\sigma^{DI}(\varepsilon_p) = \frac{S_0}{4} F\left(\frac{E_C}{\Lambda(\varepsilon_p)}\right), \quad (2)$$

где S_0 - площадь чувствительной области, E_C - критическая энергия ячейки памяти, $F(s)$ - интегральная функция распределения длин хорд параллелепипеда, Λ - ЛПЭ протонов как функция их энергии.

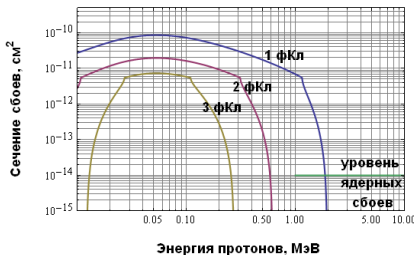


Рис. 1. Рассчитанные сечения сбоев от протонов, как функции их энергий для разных значений критических зарядов

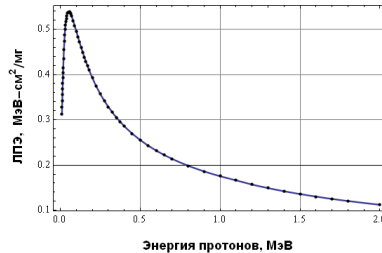


Рис. 2 ЛПЭ протонов в кремнии как функция их энергии, рассчитанные с помощью программы SRIM

Результаты расчета по формуле (2) представлены на рис. 1. Зависимость ЛПЭ от энергии в кремнии рассчитывалась в программе SRIM [3] (см. рис. 2). Как мы видим, прямая ионизация протонами при низких энергиях протонов (< 2 МэВ) приводит к повышению сечения сбоя на несколько порядков по сравнению уровнем сечения сбоев от ядерных реакций при больших энергиях протонов (> 30 МэВ).

Список литературы

1. B.D. Sierawski, J.A. Pellish, R.A. Reed, R.D. Schrimpf, K.M. Warren, R.A. Weller, et al., "Impact of low-energy proton induced upsets on test methods and rate predictions," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 6, pp. 3085–3092, Dec.2009
2. G.I. Zebrev, I.O. Ishutin, R.G. Useinov, V.S. Anashin "Methodology of Soft Error Rate Computation in Modern Microelectronics," *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2010. – V.57. №6. p. 3725 – 3733.
3. www.srim.org

Д.А. ДОМОЖАКОВ, Н.Ю. РАННЕВ
 Научный руководитель – С.В. КОНДРАТЕНКО, к.т.н., доцент
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФАЗНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УПРАВЛЯЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЕМ

Проведено сравнение основных характеристик кольцевого Current-Mode Logic (CML) генератора управляемого напряжением (ГУН) и ГУН, основанного на ячейках, включающих в себя LC – контур при работе на частоте 3,125 ГГц

Для решения ряда задач (например, в процессе разработки высокоскоростных приемопередатчиков) в высокочастотных сложно-функциональных интегральных схемах требуется применение ГУН, способных формировать набор сигналов с постоянной разностью фаз. При этом одним из наиболее критичных параметров является джиттер сигналов.

Одним из типовых решений является кольцевой генератор, включающий в себя набор однотипных инверторов. Примером может служить ГУН, построенный на CML элементах, как более быстродействующий [1] (рис. 1). Изменение частоты колебаний происходит путем изменения сопротивлений транзисторов активной нагрузки и токозадающего транзистора, что позволяет уменьшать проходящий через каскад режимный ток, увеличивая время изменения выходных сигналов, при этом сохраняя их размах в широком диапазоне изменения управляющего напряжения U_{reg} .

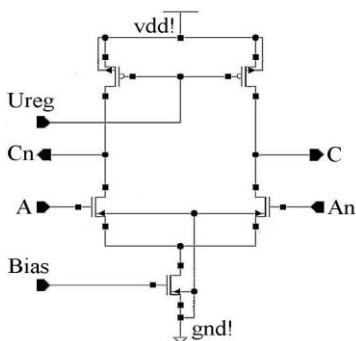


Рис.1. Ячейка кольцевого ГУН

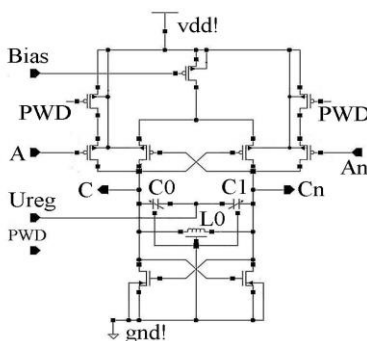


Рис.2. Ячейка LC ГУН

Альтернативным решением является ГУН, построенный на ячейках, включающих в себя LC-контур (LC ГУН) [2]. Фрагмент такого устройства представлен на рис. 2. Управление частотой происходит за счет изменения напряжения U_{reg} , приводящего к изменению емкости варикапов C_0 и C_1 , изменению частоты максимальной добротности контура и, следовательно, собственной частоты колебаний.

Было проведено сравнение основных характеристик описанных ГУН, схемы которых представлены на рис. 1 и 2. Частота генерации сигнала 3,125 ГГц. В таблице 1 представлены результаты моделирования, где $I_{\text{потр}}$ – ток потребления, ΔF – диапазон рабочих частот, ΔU_{reg} – диапазон управляющих напряжений, $J_{\text{p-p}}$ – размах джиттера, измеренный на временном интервале 1 мкс, σ – среднеквадратическое отклонение фазы сигнала от номинального значения ($\sigma = J_{\text{p-p}}/6$), ε – крутизна вольт-частотной характеристики в рабочей точке 3,125 ГГц.

Таблица 1. Основные характеристики генераторов по результатам моделирования

	$I_{\text{потр}}$, мА	ΔF , ГГц	ΔU_{reg} , В	$J_{\text{p-p}}$, пс	σ , пс	ε , ГГц/В
LC ГУН	13,95	3,0 – 3,8	0 – 1,2	2,6	0,44	0,52
ГУН	1,01	0 – 7,8	0 – 0,8	101,0	16,83	-11,68

Анализ полученных результатов показывает, что приоритет при разработке многофазных ГУН для частоты 3,125 ГГц необходимо отдавать архитектуре LC ГУН, т.к. она обладает меньшим значением джиттера (~ в 40 раз) и более нечувствительна к нестабильности U_{reg} (~ в 22 раза). К преимуществам архитектуры CML ГУН можно отнести более низкое энергопотребление (~ в 14 раз) и более широкий диапазон рабочих частот (~ в 10 раз).

Список литературы

1. Anna Peña Martinez, Design of MOS Current-Mode Logic Standart Cells //Microelectronics Systems Laboratory (LSM) Ecole Polytechnique de Lausanne (EPFL), 2007
2. Kin Keung Lee, Carl Bryant, Markus Törmänen, Henrik Sjöland. A 65-nm CMOS Ultra-Low-Power LC Quadrature VCO //Department of Electrical and Information Technology, Lund University, 2009

В.Н. СТРЕЛЬЦОВ

Научный руководитель – В.Я. СТЕНИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОДХОД К ПРИМЕНЕНИЮ ТЕХНИКИ ФИКТИВНОЙ СИММЕТРИИ В КОМБИНАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ В СОСТАВЕ ЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ

Представлен подход к применению техники фиктивной симметрии в элементах блоков комбинационной логики КМОП СБИС. Использование подхода позволяет модифицировать элементы с учетом особенностей логической структуры и режима работы блока, в состав которого они входят.

В качестве положительной стороны разделения заряда при воздействии одиночных ядерных частиц (ОЯЧ) в суб-100 нм КМОП СБИС рассматривается эффект гашения переходных процессов (SET pulse quenching) в узлах последовательных комбинационных элементов [1].

Одним из методов усиления эффекта гашения является техника фиктивной симметрии (pseudo-symmetric design) [2], предложенная для применения в составных комбинационных элементах. Техника позволяет блокировать распространение помех от ОЯЧ, возникающих в некоторых внутренних чувствительных узлах элемента, за счет дублирования транзисторов, связанных с его выходным узлом. При этом целесообразность исключения уязвимости одних чувствительных областей при одновременном добавлении других определяется исходя из их вклада в среднюю на состояние уязвимую площадь элемента, определяемую как:

$$\bar{S}_{\text{уяз.эл}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sum_D S_D^i, \quad (1)$$

где i – входное состояние из n возможных; D – обозначение уязвимых при i стоковых областей транзисторов рассматриваемого составного элемента. Уязвимая площадь вычисляется отдельно для НМОП и РМОП транзисторов элементов, так как техника [2] рассчитана на гашение, возникающее между транзисторами одного типа.

Подход, основанный на вычислении средней площади на состояние, может стать неэффективным при использовании элементов в составе блоков. Например, для НМОП транзисторов логического элемента И, состоящего из простейших элементов И-НЕ и НЕ (см. рис. 1а), согласно (1): $\bar{S}_{\text{уяз.И}} = \frac{1}{4} S(1_Y^{11} + 1_X^{00} + 1_X^{01} + 1_X^{01} + 1_X^{10})$, и выгодно сделать неуязвимыми области X и $\bar{X}$, продублировав транзистор с Y (см. топологию элемента И

на рис. 1б) и получив: $\bar{S}_{уяз.и.мод} = \frac{1}{4} S(2_Y^{11})$. Однако в блоке элементов на рис. 2а помехи с выхода И логически маскируются, когда на входе «а» лог. 0, и справедливо $\bar{S}_{уяз.и} = \frac{1}{4} S(1_Y^{11} + 1_X^{10})$ – в случае использования преобразованного элемента И возникает бессмысленная издержка по площади в виде дубля области Y. На рис. 2б изображена структура с обозначенными вероятностями 1 и 0 на входах элементов: вероятность состояния 11 на входах И больше вероятностей других состояний как минимум в 3 раза, и преобразование элемента также нецелесообразно.

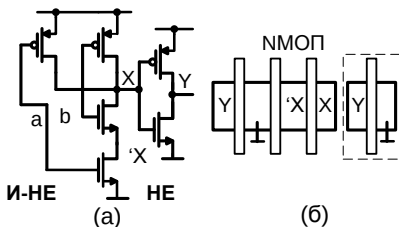


Рис. 1.

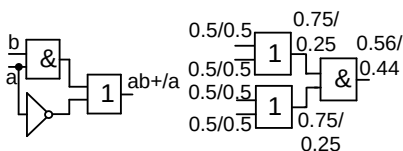


Рис. 2.

Для учета факторов, накладываемых структурой и режимом работы ИС, оценку применимости техники фиктивной симметрии следует проводить исходя из средней во времени уязвимой площади всего блока:

$$\bar{S}_{уяз.} = \sum_{j=0}^k \sum_{i=0}^n p_i \cdot S_{уяз.i}^j = \sum_{j=0}^k \sum_{i=0}^n p_i \cdot (\sum_L S_L)_i^j, \quad (2)$$

где j – номер элемента из всех k простейших элементов, составляющих комбинационный блок; L – обозначение уязвимых относительно выхода блока областей элемента j ; p_i – вероятность появления состояния i на входе блока. При этом критерием допустимости дублирования областей Y некоего простейшего элемента для обеспечения неуязвимости смежных на топологии X -областей другого, если между ними возможно гашение при l из n входных состояниях блока, будет неравенство:

$$\sum_{i=0}^n p_i \cdot (\sum_Y S_Y)_i < \sum_i p_i \cdot (\sum_X S_X)_i, \quad (3)$$

Такой подход позволяет избежать избыточных затрат площади на кристалле, повышая при этом уровень помехоустойчивости блока в целом.

Список литературы

1. Ahlbin J.R., Massengill L.W., Bhuvu B.L., Narasimham B., Gadlage M.J., Eaton P.H. Single-event transient pulse quenching in advanced CMOS logic circuits // IEEE Transaction on Nuclear Science. 2009. V. 56. №. 6. P. 3050-3056.
2. Atkinson N.M., Witulski A.F., Holman W.T., Ahlbin J.R., Bhuvu B.L., Massengill L.W. Layout technique for single-event transient mitigation via pulse quenching // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2011. V. 58. №. 3. P. 885-890.

А.В. КОБЫЛЯЦКИЙ, Д.К. СЕРГЕЕВ

Научный руководитель – Ю.М. ГЕРАСИМОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ОТ ПОПАДАНИЯ ТЗЧ В ЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПРОЕКТНОЙ НОРМОЙ 90 нм

Проведено моделирование переходных процессов, возникающих в последовательной цепи инверторов при воздействии тяжелых заряженных частиц космического пространства. Показано влияние на параметры импульса ионизационного отклика размеров инвертора, на котором моделируется импульс тока, и коэффициента нагрузки. Определены оптимальные параметры логической цепи, разработанной по 90 нм объемной КМОП технологии.

Уменьшение топологических норм проектирования интегральных микросхем приводит к увеличению чувствительности элементов к тяжелым заряженным частицам (ТЗЧ) космического пространства [1]. Одним из наиболее существенных эффектов, возникающих в логической цепи элементов при попадании ТЗЧ, являются кратковременные импульсы напряжений. Такие импульсы возникают в результате сбора неравновесного заряда вдоль трека иона обратно смещенными рп-переходами и, перемежаясь вглубь схемы, могут вызывать функциональные сбои. Подобные эффекты следует учитывать при проектировании СБИС с повышенной сбоеустойчивостью.

Наиболее распространенным способом моделирования такого эффекта является включение идеального источника тока двухэкспоненциальной формы между стоком и подложкой закрытого транзистора, в который моделируется попадание частицы. Вариации временных (длительность нарастания/спада) параметров и амплитуды импульса тока позволяют получать различные величины моделируемого заряда от частицы.

Для моделирования переходных процессов от ТЗЧ в 90нм-КМОП технологии построена логическая цепь, состоящая из двух последовательно соединенных инверторов: первый инвертор используется в качестве исследуемого, второй – в качестве элемента нагрузки. Размеры транзисторов первого инвертора составляют $0,54 \text{ мкм} \times K_{\text{МШТ}}$ – п-МОП и $0,67 \text{ мкм} \times K_{\text{МШТ}}$ – р-МОП, что при $K_{\text{МШТ}} = 1$ в 4,5 раза больше минимальных, где $K_{\text{МШТ}}$ – коэффициент масштабирования размеров. Размеры транзисторов второго инвертора установлены, соответственно, в M_L раз больше. Для исследования влияния размеров транзисторов (Рис.1,а) и коэффициента

нагрузки в исследуемом узле (Рис.1, б) коэффициенты $K_{\text{МШТ}}$ и M_L изменялись в диапазоне от 1 до 5. Вход первого инвертора заземлен. Диапазон моделируемого источником тока заряда составляет от 29 до 63 фКл при напряжении питания – 1,2 В.

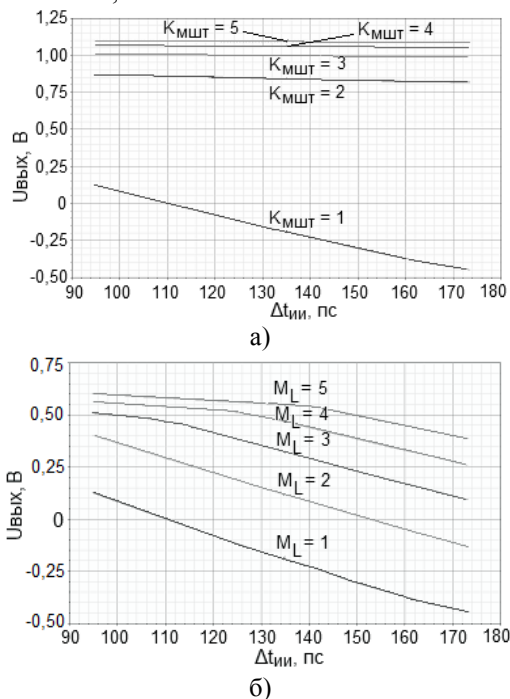


Рис. 1. Зависимость напряжения на выходе инвертора от длительности импульса тока ТЗЧ: а – в диапазоне $K_{\text{МШТ}}$, б – в диапазоне M_L

Исходя из полученных результатов, видно, что изменение $K_{\text{МШТ}}$ значительно сказывается на реакции инвертора на попадание ТЗЧ, причем даже при $M_L = 1$, увеличив исходные размеры транзисторов вдвое, удается полностью снизить чувствительность логической цепи к ТЗЧ при данных параметрах источника тока. Для достижения лучших результатов по устойчивости логической цепи к ТЗЧ необходимо выбирать M_L в диапазоне от 2 до 4. При любых ЛПЭ частицы увеличение M_L до значений выше 4 неэффективно по сравнению с аналогичным изменением $K_{\text{МШТ}}$.

Список литературы

1. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 148 с.

А.В. АНТОНЮК

Научный руководитель – В.Я. СТЕНИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КЭШ ОЗУ ПО ОБЪЕМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ КМОП 28 нм

Проведено проектирование блока кэш ОЗУ 128×32 по технологии КМОП с проектно-технологической нормой 28 нм на основе 6Т ячеек памяти. Блок предназначен для работы на тактовой частоте 1 ГГц, имеет охранные кольца для защиты от избыточного накопления заряда в приборном слое и подложке при воздействии одиночных ядерных частиц. Проведено моделирование в температурном диапазоне от -40 до 125°C при напряжениях питания от 0.8 до 1 В.

Неотъемлемой частью современных высокопроизводительных микропроцессоров является кэш ОЗУ [1]. В связи с тенденцией перехода КМОП технологии на меньшие проектные нормы встают задачи по проектированию блоков с лучшими характеристиками быстродействия, потребляемой мощности, площади на кристалле.

В результате разработана топология блока КМОП ОЗУ 128×32 с проектной нормой 28 нм в соответствии с требованиями технического задания. Суммарная площадь составляет 3588 мкм², размеры блока - 138×26 мкм. Для предотвращения возникновения тиристорного эффекта при воздействии отдельных ядерных частиц транзисторы на подложке и в *n*-кармане оснащены охранными кольцами [2]. Площадь, занимаемая охранными кольцами, равна 685.2 мкм², что составляет 18.8% от площади устройства.

Работа блока моделировалась с использованием САПР Cadence при напряжениях питания в диапазоне от 0.8 до 1 В и температурном диапазоне от -40 до 125°C с использованием моделей *tt_hvt*, *ff_hvt* и *ss_hvt* библиотеки TSMC 28 нм. Полученные при нормальной температуре для различных напряжений питания и технологических углов значения времени задержки распространения и потребляемой мощности приведены в табл. 1 и табл. 2. На рис. 1 и рис. 2 приведены характеристики быстродействия и потребляемой мощности в зависимости от температуры в диапазоне от -40 до 125°C для типичного случая (питание 0.9 В, модели транзисторов *tt_hvt*) и случаев минимального и максимального быстродействия (0.8 В, *ss_hvt* и 1.0 В, *ff_hvt* соответственно). С учетом изменения всех факторов (питание, температура, технологический угол) задержка распространения изменяется в пределах от 216 до 856 пс, а потребляемая блоком мощность от 2,24 до 7,45 мВт.

Таблица 1.

Задержка распро- странения, пс		Технологический угол		
		ss_hvt	tt_hvt	ff_hvt
Напряжение питания, В	0.8	723	501	339
	0.9	499	360	266
	1.0	372	284	219

Таблица 2.

Потребляемая мощ- ность, мВт		Технологический угол		
		ss_hvt	tt_hvt	ff_hvt
Напряжение питания, В	0.8	2.33	2.55	3.30
	0.9	3.01	3.24	4.79
	1.0	3.84	4.39	5.13

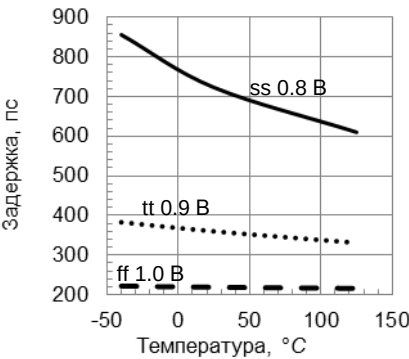


Рис. 1

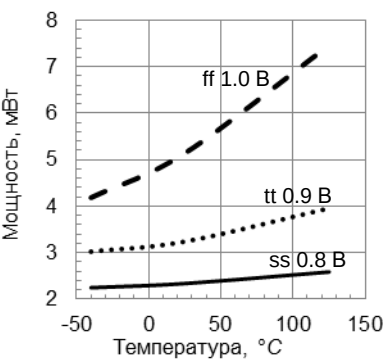


Рис. 2

Спроектированный блок имеет площадь в 2.61 раза меньшую, чем аналогичный блок кэш ОЗУ с проектной нормой 65 нм [3], а быстродействие увеличено в 1.5 раза.

Список литературы

1. Pavlov A., Sachdev M. CMOS SRAM circuit design and parametric test in nano-scaled technologies. New York: Springer, 2008.
2. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы // М.: Радио и связь, 2004. С. 84, 85.
3. Степанов П.В. Проектирование блока ОЗУ на основе 65 нм КМОП ячеек памяти повышенной сбоеустойчивости // Труды XII Курчатовской молодежной научн. школы. М.: НИЦКИ. 2014. С. 147.

М.И. ТИТОВА

Научный руководитель – К.М. АМБУРКИН, аспирант
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИНХРОИМПУЛЬСА С ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКОЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Разработан формирователь синхроимпульса с унифицированными амплитудно-временными параметрами выходного сигнала, обеспечивающий срабатывание контрольно измерительной аппаратуры от входного импульса произвольной формы в условиях электромагнитных помех и наводок при проведении радиационных испытаний на импульсных испытательных установках.

Одним из путей распространения наводок от испытательной установки к контрольно-измерительной аппаратуре (КИА) в процессе радиационного эксперимента является сигнал синхронизации, используемый для запуска КИА в момент действия импульса испытательного воздействия. Задача минимизации помех по этому каналу требует разработки устройства, обеспечивающего передачу сигнала синхроимпульса (СИ) с применением гальванической развязки входного и выходного контуров – формирователя сигнала СИ (ФСИ). Одним из подходов является использование оптопары, в результате чего единственной связью между контурами оказывается оптический канал. Устранение наводок по линии питания достигается путем применения независимых источников питания с разделенными линиями «земли». Использование оптической развязки и разделенных источников питания позволяет гальванически развязать контуры и, таким образом, избавиться как от помех, распространяющихся по цепи СИ, так и от помех по цепям питания и «земли» [1].

Амплитуда и длительность выходного СИ испытательных установок варьируются в широких пределах и могут быть недостаточными для открытия оптопары. С целью предотвращения потерь СИ малой амплитуды/длительности, а также унификации амплитуды и длительности выходного сигнала в составе ФСИ использована микросхема таймера NE555, работающего в режиме одновибратора [2]. Длительность вырабатываемого импульса определяется значением постоянной времени RC-цепи на входе таймера [2] и для указанных номиналов составляет 50 мкс. Принципиальная схема разработанного формирователя СИ приведена на рис. 1, а.

Апробация макета ФСИ, фотография внешнего вида которого показана

на рис. 1,б, проводилась при подаче на вход тестового импульса амплитудой 1,2 В и длительностью 100 нс.

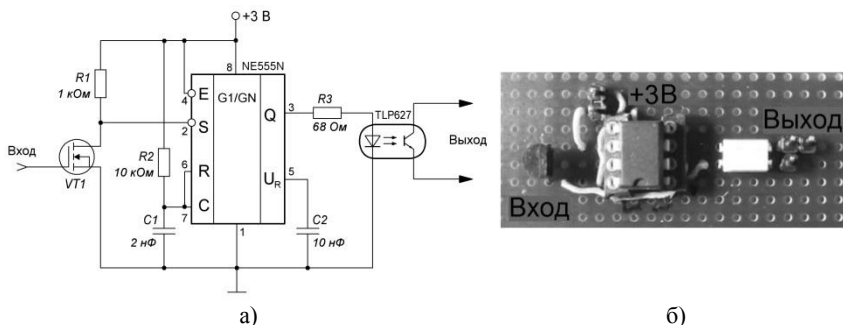
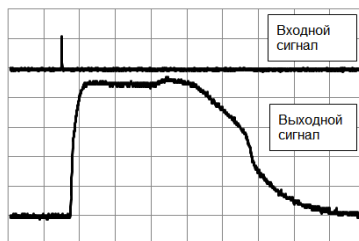


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема (а) и внешний вид макета (б) ФСИ с гальванической развязкой

Синхронные осциллограммы входного и выходного сигналов ФСИ показаны на рис. 2, характеристики ФСИ приведены в таблице. Макет ФСИ обеспечивает генерацию выходного сигнала, избавленного от помех при входном сигнале амплитудой от 1 В и длительностью от 50 нс.

Таблица. Характеристики ФСИ

Параметр, ед. измерения	Значение
Амплитуда входного сигнала, В	1...20
Длительность входного сигнала, мкс	0,05...25
Длительность выходного сигнала, мкс	50
Максимальный выходной ток, мА	150
Ток потребления от источника питания, мА	<1
Напряжение питания, В	3...16
Габариты, мм	45×20×12
Напряжение пробоя изоляции, кВ	> 5



Масштаб: 1 В/дел, 10 мкс/дел

Рис. 2. Осциллограмма входного и выходного сигналов ФСИ

Разработанный ФСИ с гальванической развязкой позволит повысить информативность и достоверность результатов радиационных испытаний в условиях электромагнитных помех и наводок импульсных испытательных установок.

Список литературы

1. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М.:Мир. 1979.
2. Reference manual. xx555 Precision Timers. Texas Instruments, 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/NE555.pdf> (дата обращения: 20.11.2015).

К.Э. ЛЕВИН

Научный руководитель – В.Я. СТЕНИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ БЛОК ШИФРАТОРА (N, K) ПО ТЕХНОЛОГИИ 28 нм КМОП

Приведены результаты моделирования восьмивходовых элементов для блока шифратора декодера ХСЯО (72,64) по проектным нормам КМОП 28 .

Эффективным широко используемым на практике способом снижения влияния сбоев данных в ОЗУ под воздействием одиночных ядерных частиц является использование помехоустойчивого кодирования и декодирования данных при записи и чтении из ОЗУ [1]. Снижение проектных норм до 28 нм КМОП привело резкому увеличению частоты одиночных сбоев КМОП элементов памяти, комбинационной логики и триггеров под воздействием одиночных ядерных частиц.

В данной работе были рассмотрены и спроектированы 8-входовые логические элементы 8И-НЕ и 8ИЛИ-НЕ с различной логикой, рассмотрены их реакции на эффекты воздействия одиночных ядерных частиц.

8-входовые элементы являются базовыми для проектирования помехоустойчивых блоков шифраторов с различными разрядностями. В обобщенном виде функциональные схемы 8-входовых логических элементов 8И, 8ИЛИ-НЕ для дешифраторов линейных декодеров могут быть представлены в условном графическом обозначении, приведенном на рис. 1.

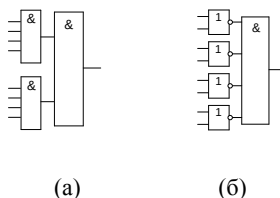


Рис. 1. Восьмивходовые логические элементы: (а) И; (б) ИЛИ-НЕ

Были спроектированы различные варианты логических элементов. Логический элемент 8И-1, выполнен на основе двух элементов 4И и одном элементе И, состоит из 30 транзисторов. Элемент 8И-2 из двух элементов 4И и одно элемента И, выполненного на двух инверторах и элементе ИЛИ-НЕ, состоит из 32 транзисторов. Логический элемент 8И-3, выпол-

нен на основе двух элементов 4И и одного элемента И, выполненного на основе элементов И-НЕ и инвертора, состоит из 54 транзисторов. Логический элемент 8ИЛИ-НЕ-1, выполнен на основе элементов 4И и четырех двухвходовых элементов ИЛИ-НЕ, состоит из 28 транзисторов. Элемент 8ИЛИ-НЕ-2, выполнен на основе элементов 4И, на основе трех элементов ИЛИ-НЕ и шести инверторов, и четырех двухвходовых ИЛИ-НЕ, состоит из 40 транзисторов.

В таблице 1 приведены параметры логических элементов шифратора для декодера (72,64): $N_{\text{Тр}}$ – количество транзисторов в элементе; $I_{\text{Потр.0}}$ – статический ток потребления элементом в состоянии логического “0” на выходе; $I_{\text{Потр.1}}$ – статический ток потребления элементом в состоянии логической “1” на выходе; $t_{1,0}$ – время задержки перехода элемента из состояния логической 1 по выходу в состояние логического 0; $t_{0,1}$ – время задержки перехода элемента из состояния логического 0 по выходу в состояние логической 1.

Таблица 1. Параметры вариантов 28-нм КМОП 8-входных логических элементов шифратора

Логический элемент	8И-1	8И-2	8И-3	8ИЛИ-НЕ-1	8ИЛИ-НЕ-2
$N_{\text{Тр}}$	30	32	54	28	40
$I_{\text{Потр.0}}$, мкА ($I_{\text{СТАТ0}}$)	7.7	7.5	15.1	5.2	9.5
$I_{\text{Потр.1}}$, мкА ($I_{\text{СТАТ1}}$)	9.8	9.4	13.1	4.2	7.8
$t_{1,0}$, пс (fall transition)	10.8	10.1	14.7	7.8	11.8
$t_{0,1}$, пс (rise transition)	15.9	14.3	19.5	11.9	15.6

Элементы 8И-2 и 8ИЛИ-НЕ-1 являются наиболее быстродействующими, потребляют меньший ток в статическом состоянии и содержат меньше транзисторов, поэтому они представляют наибольший интерес для практического использования в блоке шифратора декодера по проектной норме 28 нм КМОП.

Список литературы

1. Петров К.А., Стенин В.Я. Помехоустойчивое кодирование в КМОП ОЗУ, устойчивых к одиночным воздействиям ядерных частиц // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. № 5. С. 361–369.

Н.М. ЖИДКОВ

Научный руководитель – Н.А. УСАЧЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО КМОП КНИ ТЕХНОЛОГИИ

Представлены результаты сравнительного анализа типовых схем построения монолитных усилителей мощности с диапазоном рабочих частот до 5 ГГц, спроектированных по КМОП технологии «кремний-на-изоляторе» (КНИ) с проектной нормой 0,18 мкм.

Усилители мощности (УМ) являются базовыми функциональными блоками передающих трактов, в том числе интегральных [1]. Преимуществами КМОП КНИ технологии в сравнении с объемной КМОП технологией являются более высокие граничные частоты МОП-транзисторов, меньшая потребляемая мощность, отсутствие тиристорного эффекта [2-3]. Основными параметрами УМ в диапазоне рабочих частот (ΔF) являются коэффициент усиления (K_u), выходная мощность ($P_{\text{вых}}$), определяемая на согласованной нагрузке (50 Ом), потребляемая мощность ($P_{\text{потр}}$) [1].

Целью сравнительного анализа являлся обоснованный выбор схемы построения УМ класса «А» с ΔF до 5 ГГц, K_u более 10 дБ и $P_{\text{вых}}$ более 10 дБм для реализации по КМОП КНИ технологии. Для исследований выбраны две наиболее распространенные схемы: двухкаскадная и четырехкаскадная распределенная [1-4], показанные на рис. 1.

Схемотехническое моделирование проводилось в САПР Keysight Advanced Design System.

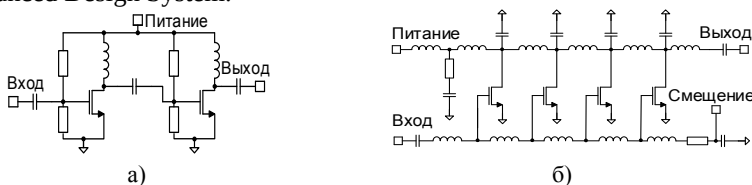


Рис. 1. Электрические схемы двухкаскадного сосредоточенного (а) и четырехкаскадного распределенного (б) УМ

Расчетные зависимости K_u от частоты и $P_{\text{вых}}$ от уровня входной мощности на частоте 3 ГГц показаны на рис 2, основные параметры приведены в таблице.

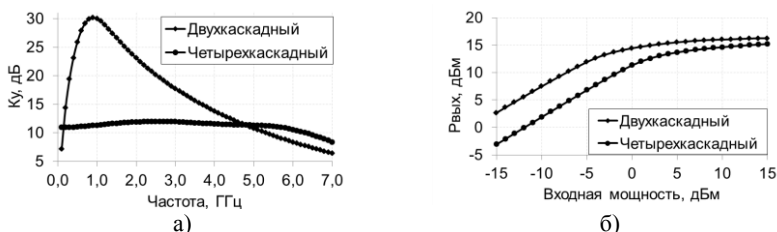


Рис. 2. Зависимости K_u от частоты (а), $R_{\text{вых}}$ от входной мощности (б)

Таблица – Сравнение параметров монолитных КМОП КНИ УМ

Параметр	Данная работа*		Аналоги-прототипы		
	Двухкаскадная схема	Четырехкаскадная схема	[2], Двухкаскадная схема	[3], Четырехкаскадная схема	[4]***, Каскадная схема
Проектная норма	0,18 мкм		0,5 мкм	0,35 мкм	0,18 мкм
ΔF , ГГц	0,1...5,3	0,1...6,3	0,9	0,05...6,3	3,0...7,5
K_u , дБ	30,0...10,0	10,0...12,0	9,9	5,1...6,5	9,0...13,0
$R_{\text{вых}}$, дБм	12,6**	12,0**	22,0	20,0	>0
$R_{\text{потр}}$, мВт	65	83	230	50	15
Упит, В	1,8	1,8	1,8	3,0	1,8

* - представлены результаты схемотехнического моделирования; ** - при компрессии амплитудной характеристики 1 дБ; *** - объемная КМОП технология.

Установлено, что четырехкаскадный распределенный УМ позволяет обеспечить большую ΔF (в 1,2 раза) при существенно лучшей неравномерности K_u (не более 2 дБ) и меньшем абсолютном значении K_u по сравнению с двухкаскадной схемой.

К существенным недостаткам распределенного УМ следует отнести прогнозируемые более высокую чувствительность параметров к влиянию паразитных элементов топологии и большую площадь, занимаемую на кристалле из-за необходимости применения значительного количества согласующих индуктивностей и конденсаторов. Таким образом, для дальнейших исследований и разработки топологии была выбрана двухкаскадная схема УМ, лишенная вышеперечисленных недостатков.

Список литературы

1. М. М. Hella, M. Ismail RF CMOS power amplifiers. Theory, design and implementation / Kluwer, -2002, -111 p.
2. D. Ngo, W.M. Huang, J. M. Ford, D. Spooner Power amplifiers on thin-film-silicon-on-insulator (TFSOI) technology / 1999 IEEE Int. SOI conf., -1999, -pp.133-134.
3. A Low-Power DC-7-GHZ SOI CMOS Distributed Amplifier / Zencir E. et al. / ISCAS-2004, -2004, -pp. 605-608.
4. A 3.0-7.5 GHz CMOS UWB PA for group 1~3 MB OFDM application using current-reused and shunt-shunt feedback / S.A. Z. Murad et al. / WCSP-2009, -2009, -pp. 1-4.

И.А. МОЖАЕВ, Д.С. КОСТЮЧЕНКО

Научный руководитель – П.В. НЕКРАСОВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЯ АУДИОКОДЕКА

В статье рассматривается процесс создания автоматизированной системы тестирования параметров микросхем аудиокодексов на основе оборудования «PXI» фирмы National Instruments. Описан процесс испытаний, приведены описания характерных видов сигналов и программного обеспечения.

Аудиокодек – микросхема, выполняющая оцифровку и выдачу аналогового аудиосигнала. Основополагающими факторами качества преобразования аудиокодека являются коэффициент нелинейных искажений (КНИ), разрядность и частота дискретизации АЦП и ЦАП. Так же немаловажную роль играют уровни выходных логических сигналов, токи потребления в динамическом и статическом режимах.

Объект исследования – 24-битный аудиокодек на печатной плате, с частотой дискретизации от 8 кГц до 192 кГц. Специально спроектированная печатная плата позволяет подключить измерительный блок к микросхеме. Питание микросхемы обеспечивается модулем NI PXI-4110, с помощью которого так же производится контроль потребляемых токов. Плата NI PXI-7841R формирует тактовые сигналы, протоколы обмена данными и сигналы управления, поступающие на входы аудиокодека.

Для работы со звуком в аудиокодеке присутствуют блоки АЦП и ЦАП. Модуль NI PXI-4461 обеспечивает тестирование этих блоков, посылая и принимая звуковой сигнал.

В процессе испытаний аудиокодека измерение параметров и проведение функционального контроля происходит последовательно в автоматическом режиме. Результаты выдаются на экран в соответствующие поля. Так же есть возможность перехода в ручной режим и проведение отдельных тестов оператором.

Созданная автоматизированная система позволяет проводить измерение параметров различных аудиокодексов в ходе различных испытаний микросхемы.

Список литературы

1. <http://www.ni.com/pxi/> – раздел на сайте National Instruments

И.О. ЛОСКУТОВ, А.Б. КАРАКОЗОВ

Научный руководитель – П.В. НЕКРАСОВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ СО ВСТРОЕННЫМ АЦП

Рассматривается автоматизированный аппаратно-программный комплекс (АПК) для тестирования 8-битных микроконтроллеров. Отличительной особенностью данной системы является возможность снимать характеристики преобразования встроенных АЦП. Аппаратно-программный комплекс создан на основе приборов PXI фирмы National Instruments и ПО LabVIEW. Приведена структурная схема АПК, описаны методы испытаний и организация прикладного ПО.

Микроконтроллеры (МК) представляют собой микросхемы, предназначенные для управления другими электронными устройствами. При тестировании МК важно контролировать как электрические параметры (токи потребления, выходные логические уровни, токи утечки), так и функционирование внутренних блоков микросхемы [1]. Важным аспектом является автоматизация тестирования МК. Это позволяет ускорить процесс измерения, уменьшить вероятность ошибки, непрерывно сохранять и обрабатывать результаты эксперимента в течение длительного времени [2].

Одной из наиболее трудоемких задач при испытаниях является тестирование аналоговых блоков МК, в частности аналого-цифровых преобразователей. Это связано с помехами на аналоговой линии, а также низкой скоростью получения характеристики преобразования (ХП) АЦП.

Данная работа посвящена созданию автоматизированной системы для тестирования МК со встроенным АЦП на основе применения оборудования «PXI» фирмы National Instruments и ПО LabVIEW. В состав комплекса входили: управляемый источник питания PXI-4110 (обеспечение питания, и, измерение тока потребления схемы встроенным амперметром) и плата цифро-аналогового ввода-вывода PXI-7841R для управления МК (задание режимов работы, контроль функционирования, снятие ХП и вычисление параметров АЦП).

Объектом для испытания был 8-битный КМОП МК с архитектурой MCS-51, тактовой частотой до 24 МГц и встроенным АЦП.

Представленный АПК является модификацией [2]. Структурная схема аппаратно-программного комплекса представлена на рисунке 1.

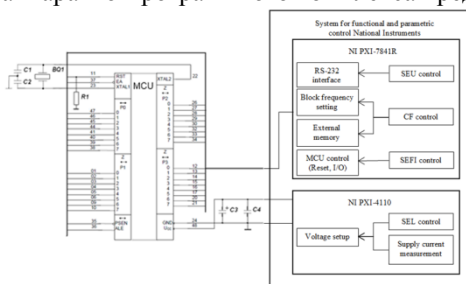


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Процесс тестирования включал в себя контроль следующих функциональных блоков: ОЗУ, арифметико-логическое устройство (АЛУ), последовательный порт UART, порты ввода-вывода, контроллер прерываний, таймеры/счетчики и контроль точностных параметров встроенного АЦП (INL, DNL, OE).

Подробное описание процедуры тестирования цифровой части МК написано в [2].

Отличительной особенностью данного комплекса является блок тестирования АЦП. Программа, написанная в среде LabVIEW, выставляла на аналоговый выход платы PXI-7841R необходимое напряжение (от 0 В до 5 В), которое выводилось на соответствующий канал АЦП МК. Затем по интерфейсу UART отсылалась команда о начале преобразования. Завершив преобразование, МК по UART передавал результат работы обратно в FPGA. Процедура повторяется до тех пор, пока не будут получены результаты на всем диапазоне напряжений от 0 В до 5 В.

В программе было предусмотрено получение одиночного преобразования или получение ХП в определенном диапазоне напряжений.

На основе ХП, программа вычисляла точностные характеристики АЦП, такие как интегральная и дифференциальная нелинейность, смещение нуля и сохраняла результат в файл лога.

Данный модифицированный комплекс успешно применяется для тестирования МК. В дальнейшем планируется создание универсальных подприборов для контроля других аналоговых блоков.

Список литературы

1. Nekrasov P.V., Demidov A.A., Kalashnikov O.A. Functional checks of microprocessors during radiation tests, Instruments and Experimental Techniques, vol. 52, no. 2, pp. 196-199. 2009.
2. Loskutov, I.O., Karakozov, A.B., Nekrasov, P.V., Nikiforov, A.Yu. Automated radiation test setup for functional and parametrical control of 8-bit microcontrollers - 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015
3. <http://www.ni.com/pxi/> – раздел на сайте National Instruments

К.М. ОМАР, К.А. МОСКАЛЕНКО

Научные руководители – П.В. НЕКРАСОВ, к.т.н., доцент

А.Б. КАРАКОЗОВ, ассистент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЯ NI MyRIO

В статье рассматривается система автоматизированного функционального и параметрического контроля датчика температуры DS1624S+, основанная на модуле NI MyRIO и программном обеспечении LabVIEW. Приведен алгоритм проведения функционального и параметрического контроля.

В данной работе описана система функционального контроля датчика температуры DS1624S+.

Разрабатываемая система должна обеспечивать подключение до 4 датчиков температуры, обеспечивать подачу питания от 2,7В до 5,5В с измерением тока потребления с точностью не хуже 0,1 мкА, должна проводить измерения выходных уровней напряжения VOL, VON, обеспечивать программирование и чтение данных по последовательному интерфейсу.

Аппаратная часть реализованной системы состоит из модуля NI MyRIO и мультиметра SANWA PC5000. Подача питания, обмен данными и измерение выходных логических уровней реализованы на основе устройства реконфигурируемого ввода/вывода NI MyRIO [1]. Мультиметр используется для измерения микроамперных токов в цепи питания микросхемы и управляется по интерфейсу RS-232 с компьютера. Пользовательское программное обеспечение разработано в среде LabVIEW.

Для организации функционального контроля необходимо реализовать последовательный интерфейс обмена данными. Чтобы исключить взаимовлияние датчиков при испытаниях, каждый датчик должен быть подключен по отдельной шине.

Было реализовано 2 способа обмена данными с датчиком :

1) с помощью встроенного аппаратного интерфейса I2C устройства MyRIO; достоинством решения является аппаратно реализованный интерфейс, но в то же время данное решение позволяет одновременно подключить лишь 2 датчика, при необходимых не менее четырех.

2) Для решения этой проблемы интерфейса I2C был реализован в составе ПЛИС FPGA.

Реализованное программное обеспечение состоит из двух частей – HOST.vi (рис.1) и FPGA.vi. Модуль FPGA реализует на низком уровне обмен данными по последовательному интерфейсу согласно документации [5]. Алгоритм передачи посылки реализуется с использованием разработанных подприборов чтения и записи байта. С помощью модуля HOST происходит управление датчиком, реализуются протоколы обмена на высоком уровне, таким образом управление ведется за счет посылки команд. В процессе работы можно выбрать один из 4 режимов: ожидание, измерение температуры, считывание и запись в память EEPROM. Полученная информация выводится на индикаторы.

Измеренное значение температуры выводится в двух байтах: MSB – целая часть, LSB – дробная часть (младшие 4 бита LSB – нули).

Питание датчиков обеспечивается с линий аналогового питания устройства NI MyRIO, способного выдавать 3 мА, этого достаточно для обеспечения тока потребления датчика, предельное значение которого не должно превышать 1,2 мА.

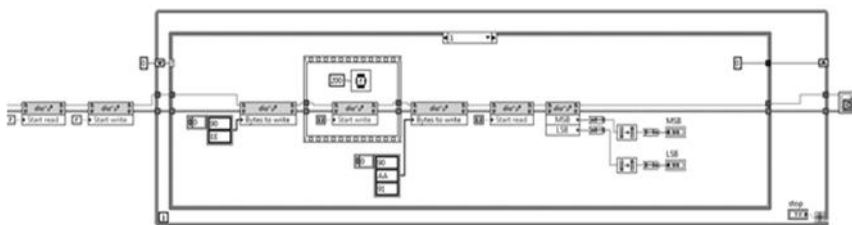


Рис.1 Блок-диаграмма HOST.vi

Полученная система позволяет одновременно обрабатывать данные до 6 датчиков температуры, измерять токи потребления и выходные напряжения микросхем. Количество датчиков ограничено количеством каналов аналогового вывода обеспечивающих питание микросхемы. Система апробирована при подготовке исследований датчиков температуры в АО "ЭНПО СПЭЛС" и ИЭПЭ НИЯУ МИФИ.

Список литературы

1. NI myRIO-1900 user guide and specifications <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>.
2. DS1624 Digital Thermometer and Memory Data Sheet <http://www.mouser.com/ds/2/256/DS1624-27266.pdf>.

Н.С. ДЯТЛОВ

Научные руководители – П.К. СКОРОБОГАТОВ, профессор

К.А. ЕПИФАНЦЕВ, инженер

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ИС НА ПОДПОРОГОВЫЙ ЭФФЕКТ

Представлен автоматизированный испытательный стенд, позволяющий проводить исследования ИС на подпороговые эффекты при минимальном участии оператора.

В работе [1] было проведено исследование ИС на подпороговые эффекты, которые возникают при многократном воздействии на выводы ИС одиночных импульсов напряжения (ОИН) амплитудой ниже порога отказа при однократном воздействии. Данное исследование проводилось на установке для однократных испытаний на импульсную электрическую прочность, которая управляется оператором вручную. Однако, для проведения более тщательного исследования подпороговых эффектов требовалось непрерывно подавать на каждый образец до 1500 импульсов, проводя после каждого импульса контроль образца на работоспособность. Такое исследование, проводимое вручную, требует значительное количество времени. Поэтому появилась необходимость автоматизации исследования.

Был разработан и изготовлен автоматизированный стенд, позволяющий проводить исследование и запись собранных данных в автоматическом режиме. От оператора требовалось только проводить замену образцов и выставлять режим работы стенда. На рис. 1 приведена структурная схема стенда.

Исследуемый образец в контактирующем устройстве (9) включается через блок коммутаций и согласований (3) в схему воздействия ОИН (10). В схеме воздействия ОИН питание образца осуществляется с помощью источника питания (2) через кабель (б). После подтверждения корректной коммутации через канал связи (д) между ПК(5) и блоком коммутаций по команде ПК (а) происходит с выхода генератора ОИН (1) подается импульс на образец по высоковольтному кабелю (в). В момент подачи импульса блок измерительных и коммуникационных устройств NI Virtual Bench фиксирует импульс напряжения генератора (н) (через делитель 1:50) и импульс тока (м), прошедший через образец. После подачи им-

пульса образец включается в схему контроля (11). С помощью блока Virtual Bench происходит автоматизированный контроль основных электрических параметров и функциональный контроль ИС через цифровые линии ввода вывода и линии аналоговых измерительных устройств (г). Все полученные данные отправляются в ПК по USB интерфейсу (е).

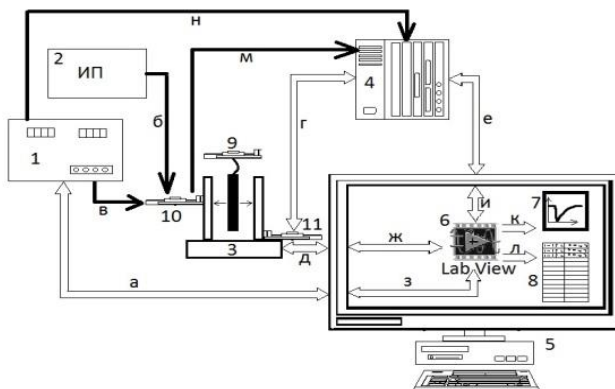


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного стенда

Если все параметры исследуемой ИС в пределах нормы и количество числа ОИН не превысило значение, заданное пользователем, то цикл повторяется. В противном случае испытания прекращаются.

На программном уровне управление испытаниями реализовано в среде программирования NI Lab View. Проект состоит из множества подпрограмм (SubVI), каждая из которых отвечает за определенный узел управления и взаимодействия. Таким образом с помощью связанных между собой подпрограмм последовательно передаются команды блоку коммутаций и согласований по интерфейсу UART (ж) на переключение образца и команды генератору по интерфейсу UART (з) на подачу ОИН. Сбор данных из блока измерений Virtual Bench осуществляется по интерфейсу USB (и). После каждого испытания полученные данные электрического и функционального контроля выгружаются (л) в таблицы Excel (8), а снятые во время подачи ОИН осциллограммы выгружаются (к) в специальный файл(7) и на лицезовую панель.

Список литературы

1. Скоробогатов П.К., Епифанцев К.А. Аддитивные эффекты в цифровых микросхемах при воздействии импульсов напряжения и закон Аррениуса// Научн.-техн. сборник «Радиационная стойкость электронных систем – Стойкость-2013».- М.: СПЭЛС-НИИП. - 2013. – С.177-178.

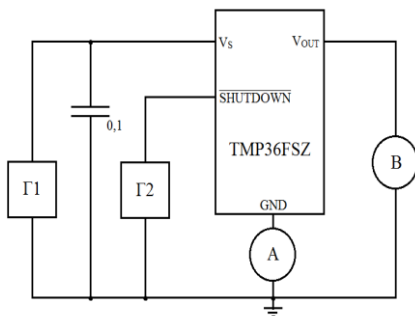
М.Е. КОРОТЕЕВ

Научный руководитель – А.В. ДЕМИДОВА, инженер
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НЕЛИНЕЙНОСТЬ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ TMP36FSZ ОТ ДОЗОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Проведено исследование радиационного поведения датчиков температуры TMP36FSZ. Обнаружены качественные различия деградации выходного напряжения при дозовом воздействии в зависимости от температуры окружающей среды.

В ходе работы исследовалось радиационное поведение датчиков TMP36FSZ. Проводился полный функциональный контроль микросхем, снималась передаточная характеристика (зависимость выходного напряжения от температуры), измерялась интегральная нелинейность выходной характеристики (максимальное отклонение экспериментальной передаточной характеристики от паспортной). На рис. 1 приведена схема включения микросхем TMP36FSZ.



Г1, Г2 – источники питания, А – амперметр,
В – вольтметр или осциллограф

Рис. 1. Схема включения микросхем
TMP36FSZ при испытаниях

Исследование микросхем проводилось при воздействии низкой интенсивности на установке «Гамма Панорама МИФИ» на изотопном источнике Co^{60} при нормальной температуре окружающей среды. Для данной микросхемы режим SHUTDOWN изменяет направление деградации.

Проводилось исследование радиационной стойкости микросхем при повышенных и пониженных температурах окружающей среды в процессе облучения. Результаты представлены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

Видно, что при повышении температуры зависимость приобретает линейный характер, а при понижении температуры - нелинейный характер с двумя точками перегиба.

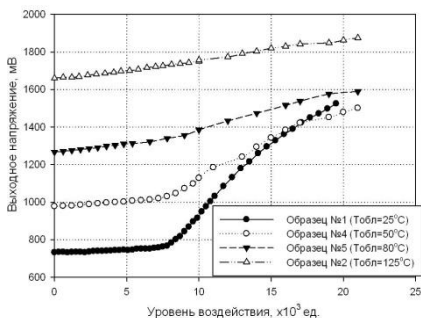


Рис. 2. Зависимости выходного напряжения микросхем TMP36FSZ от значения характеристики $7.I_7(7.C_4)$ при повышенной температуре

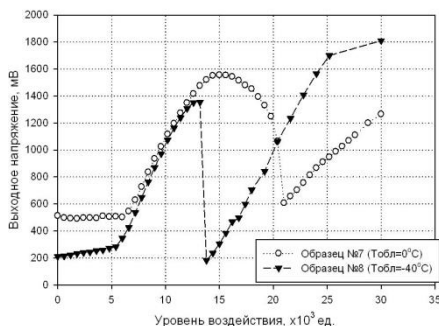


Рис. 3. Зависимости выходного напряжения микросхем TMP36FSZ от значения характеристики $7.I_7(7.C_4)$ при пониженной температуре

Анализ результатов показал, что наиболее критичным параметром при дозовом воздействии является интегральная нелинейность передаточной характеристики датчиков.

Таким образом, для разных значений поглощенной дозы передаточные характеристики датчиков носят качественно разный вид зависимости при воздействии различных температур в процессе облучения. Поэтому желательно знать температурные условия применения датчика в составе электронной аппаратуры для проведения испытаний во всем данном диапазоне.

Список литературы

1. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMP35_36_37.pdf

И.О. ЛОСКУТОВ, И.И. ШВЕЦОВ-ШИЛОВСКИЙ
Научный руководитель – П.В. НЕКРАСОВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МИКРОСХЕМ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА

Рассматривается система для управления микросхемами прямого цифрового синтеза. Система управления создана на основе модульных приборов PXI-4110, PXI-7841R и ПО LabVIEW фирмы National Instruments. Приведена структурная схема разработанной системы, организация прикладного ПО, представлены результаты тестирования некоторых микросхем.

В различных электронных устройствах часто необходима схема, которая генерирует сигналы различной частоты и позволяет управлять параметрами этого сигнала. Таким генератором может быть микросхема прямого цифрового синтеза (Direct Digital Synthesizer – DDS). Схема генерирует аналоговый сигнал за счет генерации последовательности отсчетов в цифровой форме и последующего преобразования этих отсчетов в аналоговый сигнал с помощью ЦАП [1].

В настоящее время DDS применяется в двух основных областях: генерация сигнала в коммуникационных системах и анализ сигналов в промышленных и биомедицинских системах.

При разработке устройств различного назначения часто возникает задача протестировать работоспособность микросхем прямого цифрового синтеза.

Данная работа посвящена созданию системы управления микросхемами DDS фирмы Analog Devices на основе применения оборудования «PXI» фирмы National Instruments.

Автоматизированный аппаратно-программный комплекс создан на основе модульных приборов PXI фирмы National Instruments и ПО LabVIEW. В состав комплекса входили:

- управляемый источник питания PXI-4110, которым задавалось напряжение питания микросхем;
- плата цифро-аналогового ввода-вывода PXI-7841R со встроенной ПЛИС Virtex-5R, в которой был реализован необходимый интерфейс обмена с тестируемыми микросхемами [2].

Объектом для тестирования служили схемы прямого цифрового синтеза фирмы Analog Devices. Отличительной особенностью микросхем являлся похожий интерфейс обмена – SPI, что позволило сделать систему управления микросхемами универсальной.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 1. Модули PXI обеспечивали напряжение питания и вводили тестируемую микросхему в заданный режим. Опорная частота задавалась внешним кварцевым резонатором. Выходной сигнал контролировался осциллографом.



Рис. 1. Структурная схема системы управления микросхемами прямого цифрового синтеза

Перед началом тестирования пользователю необходимо было задать настройки интерфейса обмена: выбор чтения/записи, адрес регистра, количество байт для передачи, передаваемые данные, временные задержки, порядок следования битов в посылке. Пример временной диаграммы записи данных представлены на рисунке 2.

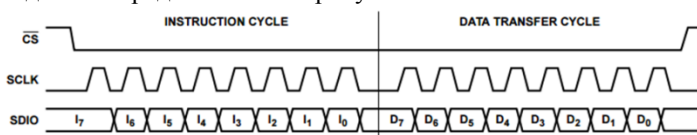


Рис. 2. Временная диаграмма записи данных микросхемы AD9910

С помощью данной системы управления успешно протестированы микросхемы AD9851, AD9910, AD9912. В дальнейшем планируется добавить систему приборами позволяющими задавать и контролировать сигнал с высокой точностью, что позволит полностью ее автоматизировать.

Список литературы

1. Е Мерфи, К.Слэттери, Власенко Алексей Прямой цифровой синтез (DDS) в тестовом, измерительном и коммуникационном оборудовании Компоненты и Технологии №8'2006.
2. <http://www.ni.com/pxi/> – раздел на сайте National Instruments
3. Loskutov, I.O., Karakozov, A.B., Nekrasov, P.V., Nikiforov, A.Yu., “Automated radiation test setup for functional and parametrical control of 8-bit microcontrollers” - 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015

В.А. МАРФИН

Научный руководитель – П.В. НЕКРАСОВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА ВНЕШНЕЙ ПАМЯТИ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

В статье рассматривается процесс реализации интерфейса внешней памяти для тестирования работоспособности микропроцессоров цифровой обработки сигналов (ЦОС) на основе применения модульного оборудования PXI фирмы National Instruments.

Тестирование работоспособности микросхем (в частности, микропроцессоров цифровой обработки сигналов) является очень важной задачей при удаленном эксперименте, а также входном контроле. При этом критичными являются реальный режим работы микросхем на предельном быстродействии. В связи с этим актуальным является создание максимально универсальной и гибкой системы тестирования различных микропроцессоров ЦОС. В [1] показано использование модуля реконфигурируемого ввода/вывода NI PXI-7841R для тестирования работоспособности микропроцессоров. Использование интерфейса внешней памяти для задач тестирования работоспособности процессоров ЦОС является более перспективным и универсальным решением.

Блок-диаграмма интерфейса внешней памяти показана на рис. 2. Алгоритм работы данного интерфейса заключается в следующей последовательности операций: 1) - ожидание строба начала цикла обмена; 2) - определение типа цикла обмена (чтение или запись информации). Одновременно происходит чтение адреса ячейки памяти, выставяемого тестируемым процессором и получение данных в блоке памяти по заданному адресу с регулируемой задержкой; 3) - в зависимости от определенного типа обмена происходит либо выставление информации на шину данных (случай на рис. 1), либо считывание информации и ее запись в блок памяти ОЗУ. Достоинствами реализованного интерфейса является его высокая степень универсальности и гибкости, а также стандарт данного интерфейса. К недостаткам можно отнести относительно невысокое быстродействие. Практическим путем было выяснено, что стабильная область работы данного интерфейса ограничивается частотами порядка 40 МГц. В ре-

зультате проведенного анализа было выявлено, что основные временные задержки в работе разработанного интерфейса возникают вследствие использования структуры Flat Sequence Structure, т.е. неконтролируемые и нефиксированные временные задержки при переходе «от кадра к кадру».

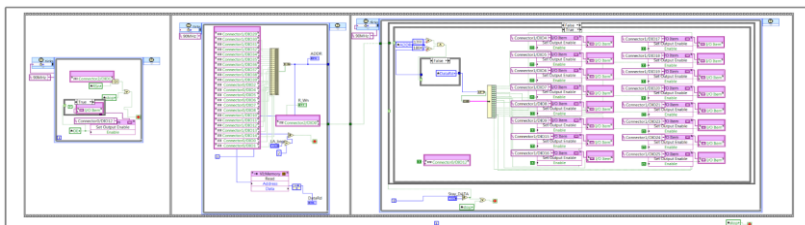


Рис. 1. Блок-диаграмма интерфейса внешней памяти (ВП). Цикл чтения.

На рис. 2 представлена блок-диаграмма усовершенствованного интерфейса внешней памяти. Ключевой особенностью данной реализации стали отказ от использования Flat Sequence Structure и размещение необходимых операций в единственном цикле Time Loop с помощью структуры Case Structure. Следует отметить, что данная реализация позволила существенно повысить быстродействие (до 100 МГц) и не содержит неконтролируемых временных задержек. Минимальный временной интервал равен периоду сигнала тактирования для цикла Time Loop. При этом сохранились такие преимущества, как универсальность, стандартизация и гибкость разработанного интерфейса внешней памяти.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 14-29-09210.

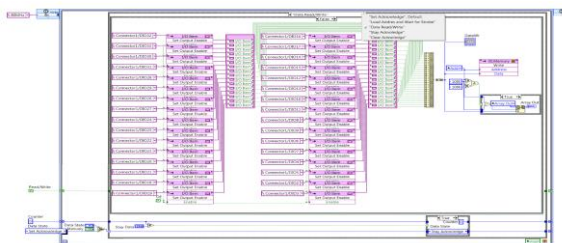


Рис. 2. Блок-диаграмма усовершенствованного интерфейса ВП. Цикл записи

Список литературы

1. Марфин В.А., Некрасов П.В. Использование модуля быстрого ввода/вывода NI PXI-7841R для проведения функционального контроля работоспособности СБИС микропроцессоров. Инженерные и научные приложения на базе технологий NI NIDays – 2014: Сборник трудов XIII международной научно-практической конференции, Москва 19-20 ноября 2014 г. — М.: ДМК Пресс, 2014. — с. 66-67.

А.А. НОВИКОВ, А.А. ПЕЧЕНКИН

Научный руководитель – А.И. ЧУМАКОВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИСПЫТАНИЯ ИС НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЗЧ В ДИАПАЗОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ

В работе представлены особенности исследований ИС лазерными методами в диапазоне температур.

Чувствительность интегральных схем (ИС) по одиночным эффектам может сильно зависеть от температуры. Поэтому часто возникает необходимость в проведении испытаний и исследований в диапазоне эксплуатационных температур. Традиционно испытания и исследования по оценке параметров чувствительности ИС проводятся с использованием ускорителей ионов и протонов, что связано с рядом сложностей. Альтернативным способом испытаний являются методы с использованием сфокусированного и локального лазерного излучения, которые не только позволяют избавиться от этих сложностей, но и предоставляет большее пространственное и временное разрешение, чем традиционные методы.

Основная проблема, которая стоит при использовании лазерных методов в диапазоне температур – определение эквивалентных значений линейных потерь энергии (ЛПЭ) для лазерного воздействия. В общем случае эквивалентные ЛПЭ определяются следующим выражением [1]:

$$LET = \alpha \cdot (1 - R_\lambda) \cdot \frac{\varepsilon_i \cdot \lambda}{hc} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{J}{K_m} = K_\lambda \cdot \frac{J}{K_m}, \quad (1)$$

где α – коэффициент поглощения лазерного излучения в полупроводнике, R_λ – коэффициент отражения, ε_i – энергия образования электрон-дырочной пары, hc/λ – энергия фотона, ρ – плотность полупроводника, K_m – коэффициент оптических потерь, K_λ – коэффициент пропорциональности между ЛПЭ и энергией лазерного импульса без учета оптических потерь.

В первом приближении только коэффициент поглощения α имеет температурную зависимость. В данном приближении выражение для эквивалентных ЛПЭ как функцию от температуры можно представить следующим образом:

$$LET(T) = LET(T_0) \frac{\alpha(T)}{\alpha(T_0)}, \quad (2)$$

где T_0 – температура, соответствующая нормальным климатическим условиям.

Пренебрежение температурной зависимостью коэффициента поглощения приводит к существенной ошибке в оценке эквивалентных ЛПЭ, что было подтверждено экспериментально. Таким образом, для испытаний и исследований в диапазоне температур лазерными методами необходимо получение достоверной информации об изменении коэффициента поглощения лазерного излучения. Простейший подход – использование табличных значений – может приводить к некорректным оценкам, т.к. коэффициент поглощения зависит от степени легирования полупроводника и для различных ИС или даже различных чувствительных областей одной и той же ИС зависимость коэффициента поглощения от температуры может меняться.

Альтернативный подход – оценка коэффициента поглощения лазерного излучения из параметров ионизационной реакции в цепи питания ИС на локальное лазерное воздействие. Амплитуда импульса ионизационной реакции может быть описана следующим выражением [1]:

$$\Delta U_{max} \approx 10^5 q_e \cdot g_0 \cdot \frac{R_t}{\tau} \cdot \frac{K_A}{K_m} \cdot J_u \cdot L_{max}, \quad (3)$$

где q_e – заряд электрона, g_0 – темп генерации носителей в кремнии, R_t – сопротивление токоусъемного резистора, J_u – энергия импульса лазерного излучения, τ – эквивалентная постоянная времени переходного процесса, L_{max} – длина собирания заряда.

Используя выражения (1) и (3) может быть получено следующее соотношение для оценки эквивалентных значений ЛПЭ в диапазоне температур:

$$\frac{LET(T)}{LET(T_0)} \approx \frac{\Delta U_{max}(T) \cdot \tau(T)}{\Delta U_{max}(T_0) \cdot \tau(T_0)} \cdot \frac{L_{max}(T_0)}{L_{max}(T)}, \quad (4)$$

где $L_{max}(T)$ может быть определена исходя из электрических параметров ИС, которые могут быть получены измерениями ионизационного отклика с различными параметрами резистивно-емкостного нагружения в цепи питания. Также ожидается, что $L_{max}(T)$ будет слабо зависеть от температуры (основываясь на [2]). Результаты экспериментов показали хорошую сходимость результатов для данного подхода.

Список литературы

1. A. L. Vasil'ev, and A. V. Yanenko, "Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs," in Proc. 12th European Conf. on Radiation and its Effects on Components and Systems, RADECS-2011, Sevilla; Spain; Sept. 19 -23, 2011, pp. 449-453
2. Arora, N.D.; Hauser, John R.; Roulston, D.J., "Electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature," Electron Devices, IEEE Transactions on , vol.29, no.2, pp.292,295, Feb 1982

Г.С. СОРОКОУМОВ

Научный руководитель – А.И. ЧУМАКОВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОДИНОЧНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ СОБЫТИЙ - SET

В статье рассмотрен подход к оценке времени одиночного переходного события, возникшего в результате воздействия на кристалл цифровой интегральной схемы отдельной ядерной частицы. Приведена структурная схема реализации предлагаемого подхода к оценке длительности SET на уровне схемотехники.

При воздействии на кристалл цифровых интегральных микросхем ионизирующего потока отдельных ядерных частиц(ОЯЧ) наблюдаются эффекты связанные как с наличием параметрических сбоев в работе микросхемы – тиристорный эффект(ТЭ), так и с возникновением функциональных сбоев – одиночные события в регистровых структурах(SEU), эффекты функционального прерывания(SEFI), одиночные переходные события(«иголки», SET).

Эффекты SEU связаны с возникновением сбоев в регистровых структурах, а также в элементах памяти. Эффекты SEU проявляются в виде инверсии хранимого бита информации в элементах памяти, регистрах. Эффекты SEFI в цифровых схемах связаны с ошибками в данных выполняемой программы. Эффекты SEFI проявляются как зависание выполнения целевой программы – требуется сброс до начальных установок, приводят к полной потери работоспособности – требуется повторная загрузка памяти программ. Отдельный класс одиночных событий - SET. SET связаны с возникновением изменения состояния выхода элемента асинхронной логики, которое, с течением времени, самопроизвольно возвращается в исходное состояние.

Классические параметры, характеризующие SET – это амплитуда переходного события U_{SET} , длительность переходного процесса t_{SET} на полувысоте. С точки зрения рассмотрения SET в цифровых интегральных микросхемах наиболее оптимальными характеристиками являются: амплитуда, приводящая к смене состояния логического элемента, длительность SET, измеренная между точками смены истинного логического состояния на инверсное и точкой возврата в исходное состояние.

На рис. 1 представлена структура предлагаемого схемотехнического метода регистрации параметров одиночных переходных процессов. В основу метода положено измерение времени SET, возникшего на выходе тестовой цепочки асинхронных логических элементов `set_out`, исходя из времени переключения логических элементов, входящих в состав схемы измерения времени переходного процесса – `SET_MEASURE_TIME`. Таким образом информация о времени одиночного переходного события – это количество переключившихся логических элементов. Оценка амплитуды SET исходит из смены логического элемента, входящего в состав исследуемой цифровой интегральной схемы. С целью оценки достаточности амплитуды SET для смены состояния логического элемента на выходе `set_out` стоят три триггерных элемента, выходы триггеров подключены к мажоритарному элементу – `TMR_SET` (см. рис. 1).

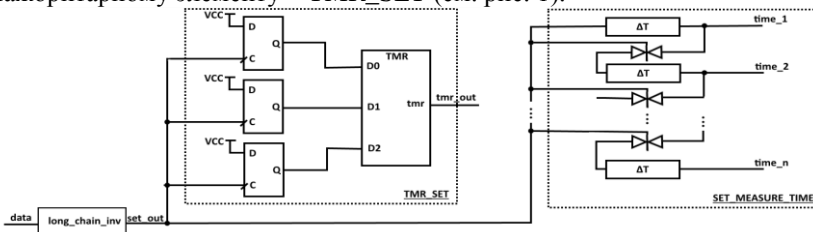


Рис. 1. Структурная схема метода регистрации SET

Таким образом, предлагаемый схемотехнический подход к регистрации параметров эффектов SET при воздействии ОЯЧ на кристалл цифровой интегральной схемы позволяет регистрировать одиночные переходные процессы длительностью не ниже времени переключения одного логического элемента; регистрируются только события, амплитуда которых приводит к смене состояния логического элемента интегральной схемы. Данный метод регистрации SET применим для программируемых интегральных схем, базовых матричных кристаллов. В ходе апробации метода разработаны VHDL описания структуры, что позволяет легко переносить решение с одного типа интегральной микросхемы на другой. Апробирован метод регистрации SET с помощью блока `TMR_SET` [1]. В ближайшее время будут получены экспериментальные результаты апробации предлагаемого подхода к оценке времени переходного процесса.

Список литературы

1. Г.С. Сорокоумов, Д.В. Бобровский, А.И. Чумаков. Проявление эффекта SET в ПЛИС на основе ANTIFUSE-ОЗУ технологии // XVII Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». Тезисы докладов. В 3-х частях. М.: НИЯУ МИФИ, 2015

А.Р. ШАРИПОВА, А.С. КОЛОСОВА

Научный руководитель – Г.Г. ДАВЫДОВ, к.т.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ МИКРОСХЕМ SN74AHC14D И SN74LVC14ADR КОМПАНИИ TEXAS INSTRUMENTS

Проведены исследования радиационного поведения микросхем SN74AHC14D и SN74LVC14ADR компании Texas Instruments разных серий, но одинакового функционального назначения.

Объектами исследований являются микросхемы SN74AHC14D и SN74LVC14ADR – 6 независимых инверторов на триггерах Шмитта.

Серия AHC (Advanced High-Speed CMOS – усовершенствованная высокоскоростная КМОП-структура) позволяет улучшить производительную скорость в условиях низкой мощности входного сигнала при наличии значительных помех. Содержит дополнительные цепи защиты от статического разряда и перегрузок по выходам, а также обладает сравнительно большим диапазоном питающего напряжения [1].

Серия LVC (Low Voltage CMOS) включает в себя устройства, специально предназначенные для работы с низким уровнем питания и малой потребляемой мощностью [2].

Работа посвящена сравнению радиационного поведения данных микросхем в условиях воздействия накопленной дозы ионизирующего излучения (ИИ).

Для исследований разработан аппаратно-программный комплекс на базе оборудования платформы PXI [3] фирмы National Instruments. Специализированное программное обеспечение для контроля параметров микросхем в процессе исследований реализовано в среде программирования NI LabVIEW 2012.

Исследования проводились на установке «Гамма Панорама МИФИ». Тип источника – Cs^{137} . В процессе исследований контролировались: ток потребления в статическом режиме (как правило, является наиболее чувствительным к воздействию накопленной дозы ИИ), а также выходное напряжение высокого и низкого уровня, входной ток, порог переключения и функционирование в диапазоне рабочих частот.

В ходе работы было выявлено критическое состояние исследуемых объектов при облучении: статический уровень лог. «0» на выходе для

микросхем обеих серий. На рис. 1 приведены зависимости тока потребления обоих типов микросхем при облучении в критическом режиме. Остальные контролируемые параметры в процессе воздействия изменялись незначительно.

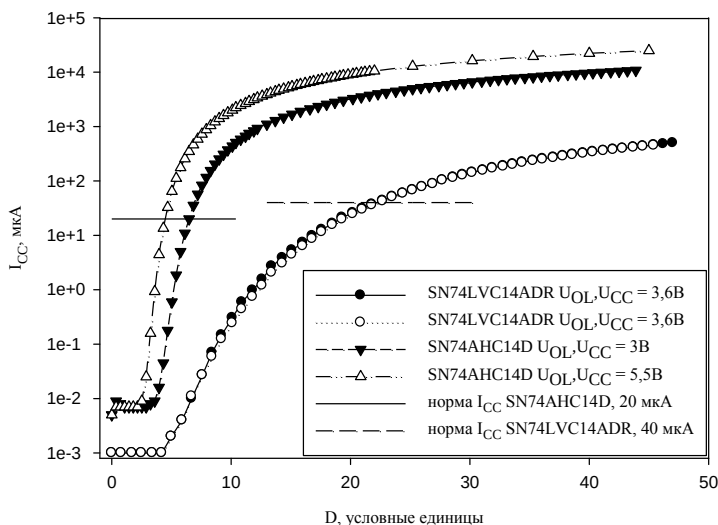


Рис. 1. Зависимости тока потребления двух типов микросхем от уровня накопленной дозы ИИ

Определены уровни параметрического отказа и показаны различия радиационного поведения микросхем SN74AHC14D и SN74LVC14ADR. Микросхемы серии LVC обладает более стабильным радиационным поведением по сравнению с АНС, разница может быть обусловлена наличием в АНС микросхемах дополнительных цепей защиты, не оптимизированных для условий воздействия накопленной дозы ИИ.

Список литературы

1. АНС/АНСТ Designer's Guide, TI, 2000. <http://www.ti.com/lit/ml/scla013d/scla013d.pdf>.
2. LVC Designer's Guide, TI, 1996. <http://www.ti.com/lit/ml/scba010/scba010.pdf>.
3. PXI advisor. <http://www.ni.com/pxi/>.

О.В. ШУМКИН

Научный руководитель – Э.В. АТКИН, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ФАЗЫ И АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Полностью цифровое устройство фазовой автоподстройки частоты (ЦФАПЧ) реализовано на 180 нм технологии. Рассматриваемый ЦФАПЧ использует цифровой генератор, чтобы достичь разрешающей способности в 3,0 пс. ЦФАПЧ является более удобным, так как оно менее чувствительно к шумам и условию эксплуатации по сравнению с аналоговым. Предлагаемый ЦФАПЧ может быть легко применен с другими компонентами в IP блоке, что делает его очень подходящим для системы на кристалле.

ЦФАПЧ является системой управления самостоятельной коррекции, в которой один сигнал подстраивается под другой сигнал. ЦФАПЧ получает только цифровые сигналы. Информация фазы и частоты может быть более точно сохранена с использованием цифровых методов. ЦФАПЧ показывает более быстрое время блокировки, и является наилучшим выбором для тактовой генерации на высокопроизводительных микропроцессорах. ЦФАПЧ состоит из следующих блоков: Фазово-частотный детектор контроллер (PFD_CTRL), цифровой генератор и делитель частоты (ДЧ). Цифровой генератор является наиболее важным компонентом в ЦФАПЧ.

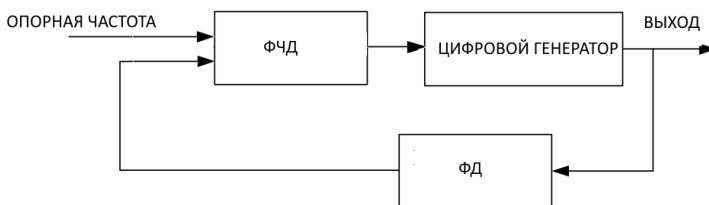


Рис. 1. Схема ЦФАПЧ

Компоненты ЦФАПЧ аналогичны аналоговому варианту ФАПЧ, но реализация состоит из цифровых компонентов. Генератор, управляемый

напряжением использовался вместо генератора с цифровым управлением. PFD_CTRL обнаруживает фазовое рассогласование частоты опорного сигнала и частоты цифрового генератора. Фазово-частотный детектор контроллер сравнивает частоты и выдает сигнал задержки, опережения или эквивалентности. ЦФАПЧ защелкивается, когда PFD_CTRL обнаруживает, что фаза и частота двух частот равны. Выходной сигнал цифрового генератора, становится близкой к опорной частоте.

Рассматриваются различные версии фазовой автоподстройки частоты [1, 2]. Цифровой генератор собран на элементарном уровне. Остальная часть ЦФАПЧ собрана с использованием языка проектирования (Verilog).

Полностью цифровой ФАПЧ зафиксировался через 2 мкс. Опорная частота была установлена в 80 МГц. Мощность полностью цифрового ФАПЧ 6.3 мВт. Диапазон частот цифрового генератора от 170 - 670 МГц.

Результаты моделирования достаточно хороши по сравнению с другими похожими моделями ЦФАПЧ. Работа была выполнена в технологии 180 нм УМС с напряжением питания 1,8 В. Блок использует только стандартные цифровые ячейки. Это значительно сокращает время проектирования.

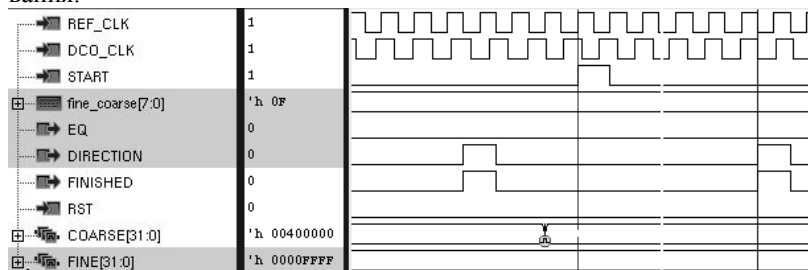


Рис. 2. Диаграмма PFD_CTRL



Рис. 3. Захват частоты

Список литературы

1. A. H. Khalil, K. T. Ibrahim, and A. E. Salama, "Digital of ADPLL for good phase and frequency tracking performance," in *Proc. of the Nineteenth National Radio Science Conference (NRSC 2002)*, Alexandria, pp. 284 – 290, March 2002.
2. T. Olsson and P. Nilsson, "A digitally controlled PLL for SoC applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 39, pp.751-760, May 2004.

В.В. ОРЛОВ, В.А. ФЕЛИЦЫН

Научный руководитель – Г.И. ЗЕБРЕВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОП-ТРАНЗИСТОРА ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Предложена компактная модель для описания входных вольт-амперных характеристик МОП-транзистора в диапазоне температур 30 – 125 °С, включая надпороговый и подпороговый участок.

Важной проблемой современной микроэлектроники является прогнозирование поведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) МОП-транзисторов в широком диапазоне температур с целью обеспечения ее надежной работы. Одним из основных недостатков современных моделей МОП-транзисторов является отсутствие единой зависимости, одинаково хорошо описывающих подпороговый и надпороговый участки ВАХ [1]. Над порогом преобладает дрейфовый ток, а под порогом – диффузионный. Поэтому, как правило, для описания этих участков используются различные зависимости, которые затем “склеиваются”, что дает недостаточно точный результат в месте их соединения. Основываясь на работе [2], использующей единую формулу для всех участков ВАХ, в данной работе было проведено моделирование температурных зависимостей вольт-амперных характеристик в диапазоне токов $10^{-10} - 10^{-4}$ А.

Зависимость тока стока I_D от напряжения на стоке V_D описывается следующей формулой [2]:

$$I_D = \frac{1}{2} G V_{DSAT} \left(1 - \exp \left(-2 \frac{V_D}{V_{DSAT}} \right) \right), \quad (1)$$

где G – полная проводимость канала, V_G - напряжение на затворе, V_{DSAT} – напряжение насыщения

$$G = \frac{W}{L} e \mu n_s (V_G), \quad V_{DSAT} = \frac{e n_s (V_G)}{C_{ox} + C_D}, \quad (2)$$

где W , L – ширина и длина канала, n_s – концентрация носителей заряда в канале, C_{ox} и C_D есть емкости окисла и обедненной области, μ - подвижность носителей заряда, e – заряд электрона. Концентрация носителей заряда в канале является явной функцией V_G [1], из чего следует, что G и V_{DSAT} имеют неявную зависимость от затворного напряжения на всех

участках ВАХ. Зависимость подвижности μ и порогового напряжения V_T от температуры T можно задать соотношениями [1]:

$$\mu(T) = \mu_0 (T_0/T)^{3/2} \quad V_T(T) = V_{T0} - \alpha_{VT}(T - T_0) \quad (3)$$

где T_0 – номинальная температура, α_{VT} – эмпирический коэффициент дрейфа порогового напряжения. В модели введен эмпирический параметр θ , учитывающий “заваливание” ВАХ, связанное с изменением подвижности с ростом напряжения на затворе:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \theta(V_G - V_T)} \quad (4)$$

На рис.1 приведено сравнение расчетных и экспериментальных ВАХ в линейном и логарифмическом масштабе при температурах: $T_1 = 31^\circ\text{C}$, 80°C и 125°C , и напряжении на стоке $V_D = 50$ мВ.

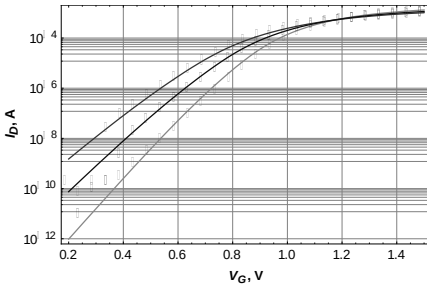


Рис. 1а. Зависимость тока стока I_D от напряжения на затворе V_G в логарифмическом масштабе (ток в подпороговой области растет с температурой)

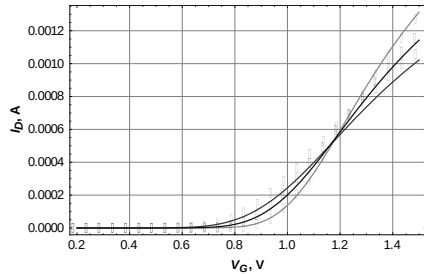


Рис. 1б. Зависимость тока стока I_D от напряжения на затворе V_G в линейном масштабе

С помощью полученной модели была произведена экстракция параметров МОП-транзистора: $\mu_0 = 275 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\alpha_{VT} = 2 \text{ мВ/К}$, $V_{T0} = 0.7 \text{ В}$, $d_{\text{ок}} = 20 \text{ нм}$ – толщина подзатворного диэлектрика, $\theta = 0.35 \text{ В}^{-1}$. Таким образом, предложенная модель хорошо описывает ВАХ МОП-транзисторов для температур в диапазоне от комнатных до $+125^\circ\text{C}$.

Список литературы

1. S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
2. Г.И. Зебрев, Физические основы кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие – М.: МИФИ, 2008.

И.Г. САГДИЕВ

Научный руководитель – Э.В. АТКИН, к.т.н., доцент
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СЛОЖНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ БЛОК ПРЕДУСТАНОВКИ ПОРОГОВ КОМПАРАТОРОВ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

Рассматриваются основные этапы проектирования принципиальной схемы и топологии блока предустановки порогов многоканальных компараторов на основе цифро-аналогового преобразователя в КМОП технологии.

В предложенной схеме основу блока предустановки порогов компаратора было выбрано в виде ЦАП с поразрядным взвешиванием, схема которого представлена на рис. 1. На входы ЦАП подается цифровой код, в зависимости от которого, формируется порог компаратора.

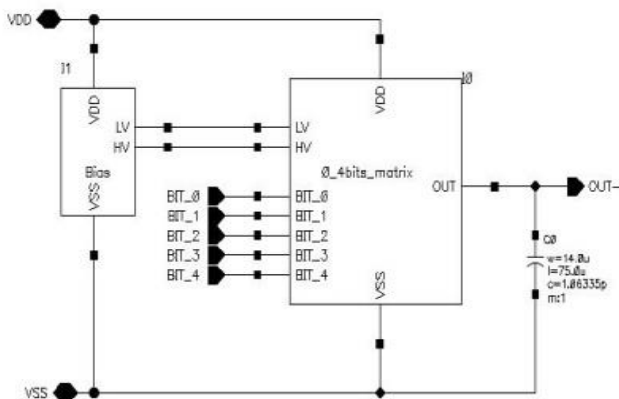


Рис. 1. Структурная схема ЦАП

Схема включает в себя матрицу источников тока и опорное напряжение. Цифровым кодом коммутируются ключевые транзисторы, тем самым формируя ток на токозадающем транзисторе источника тока. Величина тока зависит от геометрии токозадающего транзистора и пропорциональна значению бита, которому соответствует источник тока. Циклический код представлен на рис. 2.

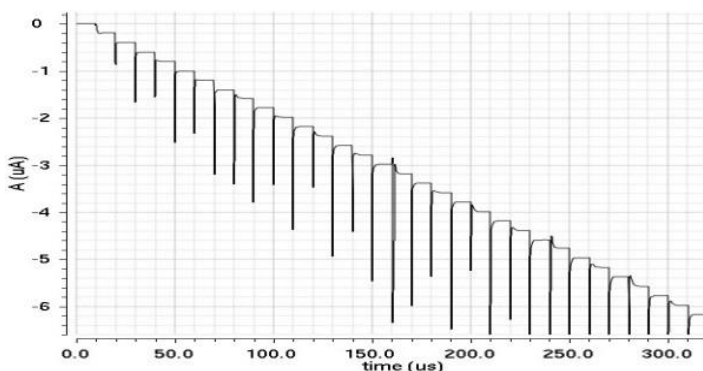


Рис. 2. Циклический код ЦАП

Была спроектирована топология ЦАП (рис. 3). Топология занимает 0.02мм^2 на кристалле.

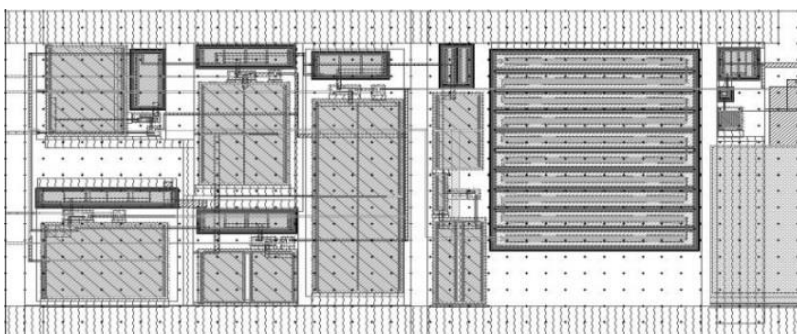


Рис. 3. Топология ЦАП

ЦАП был спроектирован в САПР Cadence. Спроектированный ЦАП обладает следующими параметрами: разрядность – 5 бит, МЗР – 200 нА, потребляемая мощность – 49 мкВт, напряжение питания – 1.8 В.

Список литературы

1. A 10 bit, 300 MS/s Nyquist Current-Steering Power DAC With 6 V Output Swing Mohammad S. Mehrjoo, Student Member, IEEE, and James F. Buckwalter, Senior Member, IEEE, IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 49, NO. 6, JUNE 2014.
2. The Art of Analog Layout, Prentice Hall, 2001, Ray Alan Hastings, 539 с.

К.Ю. ОБЛОВ

Научный руководитель – Н.Н. САМОТАЕВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕСТОВЫХ МАЛОМОЩНЫХ МИКРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Работа нацелена на создание тестовых микронагревателей методом лазерной гравировки Al_2O_3 керамической подложки для их последующего использования в составе чипов полупроводниковых газовых датчиков.

В настоящее время большое внимание уделяется маломощным газовым датчикам в виду роста популярности беспроводных газоаналитических систем. Данные системы более просты в установке-отсутствие кабеля позволяет осуществлять их быстрый монтаж даже в самых труднодоступных местах, а малая мощность потребления должна обеспечить бесперебойную работу датчика от одной пальчиковой батарейки на протяжении полутора лет. Для работы полупроводниковых газовых датчиков требуется поддерживать температуру газочувствительного слоя в диапазоне от 250 до 550 $^{\circ}C$, для данной задачи и необходим микронагреватель. Мощность, потребляемая газовым датчиком, обусловлена мощностью, потребляемой микронагревателем.

Новый подход к изготовлению микронагревателей подразумевает несколько этапов (рис. 1).



Рис. 1. Этапы изготовления микронагревателя. Слева направо: чип микронагревателя после гравировки; лицевая сторона микронагревателя после гравировки; нагреватель с нанесенной платиновой пастой; отожженный нагреватель; нагреватель в рабочем непрерывном режиме при температуре 650 градусов Цельсия.

Первый этап- изготовление компьютерной 3д модели будущей структуры нагревательного электрода, после чего в специальном программном

обеспечении, разработанном научной группой «Сенсор» на кафедре «Микро- и наноэлектроника», происходит переформатирование 3д модели в формат, поддерживаемый лазерными граверами, что позволяет изготавливать объемные микроструктуры методом лазерной гравировки керамических материалов на стандартном лазерном оборудовании, осуществляющем обычную планарную гравировку. Следующим этапом является нанесение платиновой пасты на структуру микронагревателя, последующий отжиг полученной структуры. На последнем этапе в микронагреватель вжигаются контактные электроды.

На сегодняшний момент данным методом изготовлены микронагреватели с шириной нагревательного электрода 120 мкм, толщиной 80 мкм (рис. 2) и средней потребляемой мощностью порядка 2 мВт/Со [1,2,3].

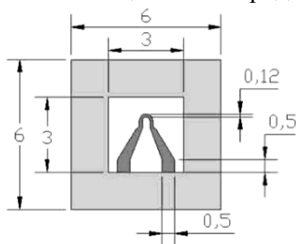


Рис. 2. Чертеж микронагревателя (размеры приведены в миллиметрах)

В перспективе планируется уменьшение ширины нагревательного электрода до 30-40 мкм, уменьшение толщины до 15-30 мкм, а так же общее уменьшение габаритных размеров чипа микронагревателя до квадрата со стороной 3 мм, что снизит среднюю потребляемую мощность примерно до 0,5 мВт/Со.

Список литературы

1. Samotaev N.N., Vasiliev A.A., Oblov K.Y., Soloviev S.A., Kushneruk A.V., Voronov Y.A., Sushko D.V. Technology for fast fabrication of glass microhotplates based on the laser processing// Prec. 5th GOSPEL Workshop: Gas sensor based on semiconducting metal oxide-basic understanding and application field, 26th-29th, May 2013, Oita, Japan, pp.48-49.
2. N.N. Samotaev, A.V. Ivanova, K.Y. Oblov, S.A. Soloviev, A.A. Vasiliev., Wi-Fi Wireless Digital Sensor Matrix for Environmental Gas Monitoring// Prec. The 28th European Conference on Solid-State Transducers EUROSENSORS 2014, 7th-10th, September 2014, Brescia, Italy, B4P-K02.
3. Vasiliev A.A., Sokolov A.V., Legin A.V., Samotaev N.N., Oblov K.Yu., Kim V.P., Tkachev S.V., Gubin S.P., Potapov, G.N., Kokhtina Yu.V., Nisan A.V., Additive technologies for ceramic MEMS sensors// Procedia Engineering, volume 120, 2015, Pages 1087-1090/

А.В. ИВАНОВА

Научный руководитель – Н.Н. САМОТАЕВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПОСЛОЙНОГО РАЗРАВНИВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изготовлена первая модификация установки послойного разравнивания порошковых материалов, способная осуществлять дискретное нанесение слоев толщиной 200 мкм в камере 2х2 см, глубиной 3 см.

Селективное лазерное спекание (Selective Laser Sintering, SLS) [1] является современной технологией производства, которую создавали в 1980-х годах. Технология универсальна с точки зрения выбора материалов по сравнению с другими методами аддитивного производства [2]. Данная технология позволяет послойно выращивать объемные 3D-модели [3] из таких материалов, как полистирол, АБС, нейлон, титан, кобальт-хромовые сплавы, сталь, драгоценные металлы, песчаные смеси и композиты [4, 5]. В настоящее время ввиду сложности процесса селективного лазерного спекания промышленные установки, работающие по данной технологии, выпускаются в совокупности с лазерными излучателями, что сильно удорожает стоимость установки, но при этом обеспечивает высокое качество спекаемых моделей. Установка послойного разравнивания порошковых материалов (ПРПМ) в настоящее время не представлена на рынке и призвана заполнить пустующую нишу недорогого оборудования для селективного лазерного спекания среднего качества.

В НИЯУ МИФИ на кафедре «Микро- и наноэлектроники» в научной группе «Сенсор» ведутся экспериментальные работы по изготовлению недорогой универсальной установки, которая представляет собой герметичную камеру с системой послойного разравнивания порошковых материалов. Данная установка не имеет в своем составе лазерного излучателя, а работает с любыми лазерными граверами (твердотельными, волоконными, CO₂) и синхронизируется с ними посредством фотодатчиков. Установка ПРПМ выступает в роли дополнительного оборудования, использование которого в совокупности с лазерными граверами расширяет их функционал, позволяя на их основе производить послойное лазерное спекание порошковых материалов.

В настоящее время изготовлена первая модификация установки послойного разравнивания порошковых материалов, способная осуществлять дискретное нанесение слоев толщиной 200 мкм в камере 2х2 см, глубиной 3 см. Данная система не имеет герметичной камеры и подогрева емкости с порошком, что отрицательно сказывается на качестве процесса спекания. Данные нюансы будут учтены в рамках изготовления второй модификации установки. Ее конструкция позволит проводить спекание порошковых материалов в инертной среде, появится возможность регулировать температуру емкости с порошком от 20 до 450°C, заметно уменьшатся габаритные размеры и вес камеры. Установка будет совместима с лазерными граверами и способна создавать объемные 3D-модели из различных порошковых материалов. В рамках использования изготавливаемой установки будет возможно получить на основе компьютерных 3D-моделей послойно выращенную реальную деталь небольших габаритов (5х5х5 см) из металлических и неметаллических материалов.

Основные технические параметры разрабатываемой установки: толщина разравниваемого слоя 50 мкм; температура нагрева емкости с порошком от 0 до 450°C; размер камеры построения 5х5х5 см; обеспечение герметичности камеры построения; вес до 2 кг; оптическая система синхронизации установки с внешним лазерным излучателем.

Функциональным аналогом разрабатываемой установки является промышленное оборудование селективного лазерного спекания, недостатком которого является высокая стоимость (от 20 млн. руб.). Планируемая стоимость реализуемой установки составит 250 тысяч рублей; планируемая себестоимость после окончания научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ составит 50 тысяч рублей.

Список литературы

1. Kumar, S. Selective Laser Sintering/Melting (2014) Comprehensive Materials Processing, 10, pp. 93-134.
2. Garg, A., Tai, K., Savalani, M.M. State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes (2014) Rapid Prototyping Journal, 20 (2), pp. 164-178.
3. Maslin, E. The third (3D) industrial revolution (2014) Offshore Engineer, 39 (10), pp. 44-46.
4. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов. Учебное пособие. // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. — 59 с.
5. Шишковский И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 424 с.

С.А. СОЛОВЬЕВ

Научный руководитель – Н.Н. САМОТАЕВ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРЯМОЙ ПЕЧАТИ ПРОВОДЯЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

В рамках работы создается экспериментальная установка прямой печати проводящими материалами, для нанесения тонкой металлизации (шириной от 50 мкм) на подложки из различных материалов.

В настоящее время большую популярность набирает технология нанесения металлизации методом прямой печати на различные поверхности: печатные платы, керамические или кремниевые подложки, гибкие дисплеи и т.д. Данная технология позволяет ускорить и значительно снизить стоимость производства печатных плат, различных микроэлектромеханических структур. Существующее промышленное оборудование, работающее по технологии струйной печати металлическими чернилами, например принтер Dimatix DMP-2831, стоит около 70 000 долларов США, что не позволяет использовать подобные системы небольшим научным группам или в рамках малых инновационных предприятий.

На данном этапе на базе ЧПУ станка создана первая модификация установки прямой печати, которая работает по принципу непрерывной подачи материала и позволяет наносить вязкие материалы по прямой линии с дорожкой шириной 1 мм, в качестве минусов отмечается большая инерционность системы, а так же сложность контроля производительности. В следующих модификациях установка будет реализована по принципу импульсной генерации капель, что позволит получать металлизацию шириной 50 мкм ввиду возможности лучшего контроля производительности и дискретности времени выброса капли, что так же облегчает построение металлизации по заранее заданной криволинейной траектории. В рамках модернизации установки прямой печати анализируются различные типы генераторов капель: пьезоэлектрические, термические, пневматические, генераторы с электростатическим приводом[1,2].

Список литературы

1. D. Abdolrahman, C.K. Boo, T.S.T. Mohammad, A collapsing bubble-induced microinjection: an experimental study, *Experiments in Fluids* 46 (2009) 419–434.
2. B.D.M. Roek, M. Elwenspoek, Explosive micro-bubble actuator, *Sensors and Actuators A* 145–146 (2008) 387–39

А.В. ГЕРАСИМЧУК, М.С. КОБЗАРЬ, Г.Ю. ЖИХАРЕВ
Научный руководитель – И.И. ШАГУРИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КРИПТОБЛОКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СОСТАВЕ «СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ»

Исследование и проектирование конвейера для вычисления хеш-функций различных алгоритмов шифрования с целью разработки эффективного высокоскоростного универсального криптографического блока на примере кольцевых исполнительных каналов.

Объем информации, передаваемой по телекоммуникационным системам, быстро растет вместе с ростом требований достоверности и конфиденциальности. Одним из путей решения является криптографическое шифрование передаваемой информации, а точнее криптоалгоритмы хеширования, выполняющие вычисление хеш-функций. Хеш-функция представляет собой последовательность длиной от 128 до 512 бит. Последовательность уникальна для каждого зашифрованного сообщения, что позволяет использовать ее для идентификации сообщений, выявления фактов изменения их содержания, быстрого поиска нужной информации в базах данных и для других целей. Наиболее распространенными алгоритмами хеширования являются MD-5, SHA-1 и SHA-256, в соответствии с которыми хеш-функция определяется путем разбиения сообщения на блоки данных размером 512 бит (16 слов по 32 бита) и последовательностью операций их обработки [1]. В зависимости от алгоритма для получения хеш-функции необходимо 64 или 80 итераций, разделенных на 1 или 4 раунда. На каждой итерации выполняется набор операций сложения, сдвига и логического преобразования 32-битных операндов в соответствии с заданным алгоритмом обработки [1]. В результате получается хеш-функции 128, 180 или 256 бит для криптоалгоритмов MD-5, SHA-1 и SHA-256 соответственно.

Криптоблоки, реализующие алгоритмы хеширования, включены в состав ряда типов микроконтроллеров и «систем на кристалле» (СнК). Для повышения производительности этих криптоблоков можно реализовать их в виде конвейера из исполнительных модулей, каждый из которых выполняет одну итерацию. При реализации алгоритмов SHA-1, SHA-256 для

большинства итераций требуется не только вычисление хеш-функции, но и преобразования слов данных. Поэтому параллельно с конвейером вычисления хеш-функции используется конвейер преобразования слов блока данных, обеспечивающий поступление в вычислительный конвейер преобразованных слов данных. Криптоблок, реализующий криптоалгоритмы, должен иметь синхронно работающий вдвоенный исполнительный конвейер, состоящий из конвейера преобразования слов блока данных (КПД) и конвейера вычисления хеш-функции (КВХ). Преобразование слов для всех трех алгоритмов выполняется раундами по 16 итераций, поэтому для синхронизации конвейеров при реализации SHA-1 (80 итераций) конвейер КВХ переводится в режим работы с пятью псевдораундами по 16 итераций.

Чтобы избежать формирования в СнК длинных конвейеров (64 или 80 ступеней) в разработанном криптоблоке используются вдвоенные 16-ступенчатые кольцевые исполнительные конвейеры (КПД – КВХ), выполняющие один раунд или псевдораунд вычисления хеш-функции. В этом случае получение хеш-функции для одного блока данных потребует 4 или 5 циклов прохождения конвейера. Повышение производительности обеспечивается при параллельном включении четырех кольцевых конвейеров. При этом в состав криптоблока вводится системный коммутатор, выполняющий необходимое распределение поступающих блоков данных между исполнительными конвейерами.

В ходе исследования разработаны RTL-модели 16-ступенчатого исполнительного конвейера и фрагмента криптоблока, содержащего 4 конвейера и системный коммутатор, которые реализуют любой из указанных алгоритмов при поступлении соответствующего управляющего кода. При полной загрузке конвейеров на выходе криптоблока обеспечивается формирование хеш-функции в каждом такте работы конвейера при выполнении алгоритмов MD-5, SHA-256. Разработанные модули могут использоваться как сложно-функциональные блоки при проектировании криптоблоков, реализуемых в составе «системы на кристалле».

Список литературы

1. Самоделов А. Криптография в отдельном блоке: криптографический сопроцессор семейства STM32F4xx. // Новости электроники. -2012, №6.

Л.А. ЩИГОРЕВ

Научный руководитель – И.И. ШАГУРИН, д.т.н., профессор
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
ЗАО НТЦ «Модуль», Москва*

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СБОЕ- И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ВСТРОЕННОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Рассмотрены комбинации классических методов повышения сбое- и отказоустойчивости элементов встроенной статической оперативной памяти таких как: контроль четности, коды обнаружения и коррекции ошибок, резервирование отдельных элементов памяти. Даны оценки аппаратурных затрат, накладываемых применением данных способов повышения сбое- и отказоустойчивости.

При проектировании электронных систем одной из важнейших проблем является обеспечение надежности и достоверности хранения и передачи информации (команд, адресов, данных). Современные микросхемы изготавливаются с помощью суб-100нм кремниевых технологий. Ячейки памяти, реализованные с помощью этих технологий, имеют повышенную чувствительность к воздействию таких внешних факторов, как попадание тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), которые вызывают возникновение сбоев и отказов [1]. Поэтому при разработке и применении таких микросхем необходимо использовать эффективные методы повышения их сбое- и отказоустойчивости. Использование таких методов как аппаратное резервирование, применение кодов обнаружения и коррекции ошибок, перемежение данных достаточно подробно описаны в технической литературе [2-3].

Широко известный метод троирования с мажоритированием требует значительных дополнительных аппаратурных затрат – увеличения объема памяти в 3 раза, что ограничивает возможности его применения. Более экономичным по аппаратурным затратам является метод резервирования отдельных элементов запоминающих устройств (например, колонок и/или строк) в размещаемой на кристалле матрице памяти.

Аппаратурные затраты на реализацию этого метода зависят от количества резервных элементов (например, резервных столбцов в банке памяти) и от площади, занимаемой блоком самовосстановления, который обычно составляет единицы процентов от площади блока памяти. Этот способ позволяет повысить отказоустойчивость блоков памяти, но не обеспечивает защиту от возникающих сбоев.

Для защиты от сбоев можно использовать методы помехоустойчивого кодирования, которые позволяют выявить и скорректировать ошибки, возникающие в передаваемой и хранящейся информации вследствие сбоев или отказов, ценой введения дополнительных контрольных разрядов. Наиболее простой метод контроля по четности позволяет определить возникновение одиночной ошибки с помощью одного контрольного бита. В современной цифровой технике обычно реализуется побайтный контроль четности. В связи с этим необходимо разделять длинные информационные слова на банки, хранящие 8-битные слова. Для коррекции одиночной ошибки в зависимости от разрядности информационного слова требуется четыре и более проверочных разрядов. Введение бита четности в каждое слово, хранящееся в отдельном банке, позволяет обнаружить одиночную ошибку при выполнении операций записи/чтения в/из ОЗУ.

Разделение длинных информационных слов на короткие позволяет пропорционально увеличить число количество корректируемых одиночных ошибок и число резервных элементов, используемых для вновь образованного банка.

Для эффективного решения задачи повышения сбое- и отказоустойчивости предлагается использовать комбинации следующих методов:

- аппаратное резервирование элементов (столбцов) запоминающих устройств;
- кода Хэмминга [4], корректирующий одиночную ошибку;
- побайтовый контроль четности;
- перемежение данных;

Проведенное исследование показало, что применение комбинированных методов позволяет повысить сбое- и отказоустойчивость встроенных блоков статических ОЗУ ценой увеличения в 1,5 – 2,0 площади, занимаемой на кристалле матрицей ячеек памяти.

Список литературы

1. Зебрев Г.И. Радиационные эффекты в интегральных схемах высокой степени интеграции, М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 148 с.
2. Юдинцев В. Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007, №5. С. 72-77.
3. Ачкасов В.Н., Смерек В.А., Уткин Д.М., Зольников В.К. «Методы обеспечения стойкости микросхем к одиночным событиям при проектировании радиационно-стойких микросхем» // V Всероссийская научно-техническая конференция “Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)”. Сб. трудов. М.: ИПИМ РАН, 2012. С. 634-637.
4. Hamming R.W. Error Detecting and Correcting Codes – Bell Syst. Tech. J., 1950, vol. 29, pp. 147-160.

К.А. ЕСЕНЬКОВ, Г.Ю. ЖИХАРЕВ

Научный руководитель – И.И. ШАГУРИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ ХЕШИРОВАНИЯ В СОСТАВЕ «СИСТЕМ НА КРИСТАЛЛЕ»

В работе рассматривается применение универсального исполнительного модуля, как ступени конвейера обработки сообщений с помощью криптоалгоритмов MD5, SHA1, SHA256.

Криптографическое шифрование – один из главных способов удовлетворения требований достоверности и конфиденциальности передаваемой информации. Наиболее распространенными алгоритмами хеширования являются MD-5, SHA-1 и SHA-256.

Для аппаратной реализации алгоритмов используются специальные криптоблоки. Такие криптоблоки имеются в составе микроконтроллеров, выпускаемых компаниями STMicroelectronics [1], Freescale Semiconductors и других. Их использование позволяет освободить центральный процессор от вычисления хеш-функций, повысить производительность и расширить функциональные возможности реализуемых систем.

В связи с этим представляется целесообразным включение криптоблоков в состав проектируемых «систем на кристалле» (СнК), область применения которых требует использования хеш-функций.

Вычисление хеш-функции производится путем сложения и сдвига 32-битных операндов и выполнения набора логических операций: И, ИЛИ, НЕ, Исключающее ИЛИ над этими операндами. Поэтому разработанный универсальный исполнительный модуль содержит: 32-разрядный сумматор нескольких операндов, 32-разрядный программируемый логический блок, коммутаторы для сдвига 32-разрядных операндов на требуемое число разрядов, блок 32-разрядных регистров для хранения слов или промежуточных значений вычисляемой хеш-функции.

Последовательное включение двух исполнительных модулей образует одну ступень исполнительного конвейера, которая выполняет одну итерацию вычисления хеш-функции за два периода тактового сигнала. Исполнительные модули используются также для обработки слов, поступившего блока данных, которая требуется для реализации алгоритмов SHA-1, SHA-256.

Разработана RTL-модель исполнительного модуля и на его основе построен 16 ступенчатый исполнительный конвейер, выполняющий 16 итераций вычисления хеш-функции. Проведен логический синтез разработанных моделей средствами САПР компании Cadence с использованием функциональной библиотеки элементов с технологическими нормами 65 нм.

Получены оценки ожидаемых характеристик исполнительного модуля: площадь, занимаемая на кристалле, $0,013 \text{ мм}^2$, потребляемая мощность 9,1 мВт при максимальной тактовой частоте 1 ГГц.

В составе СнК для выполнения одной итерации требуется 2-4 исполнительных модуля. При этом для вычисления хеш-функции блока данных необходимо последовательное выполнение M итераций, что потребует $2M$ тактов. С использованием исполнительных модулей можно также реализовать различные варианты исполнительных конвейеров для обработки потоков поступающих блоков данных.

В этом случае при полной загрузке конвейера можно обеспечить получение хеш-функции каждые 2 такта работы системы. Однако значения площади и энергопотребления таких конвейерных криптоблоков будут пропорционально более высокими.

Разработанный универсальный исполнительный модуль может служить в качестве сложно-функционального блока при проектировании СнК с различными вариантами криптоблоков, выбор которых зависит от области их применения и требований к их характеристикам.

Список литературы

1. Сомодов А. Криптография в отдельном блоке: криптографический сопроцессор семейства STM32F4xx. // Новости электроники. -2012, №6.

А.В. ГЕРАСИМЧУК, М.С. КОБЗАРЬ

Научный руководитель – И.И. ШАГУРИН, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА КРИПТОБЛОКА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ДЕШИФРАЦИЮ В СООТВЕТСТВИИ С АЛГОРИТМОМ DES, ДЛЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В докладе рассмотрена разработка криптоблока, выполняющего высокопроизводительный конвейерный подбор ключей по алгоритму DES с изменяемой начальной известной информацией. Криптоблок реализован и протестирован на ПЛИС Kintex 7-ого поколения.

Перебор ключей или нахождение хеш-сумм с использованием различных алгоритмов чаще всего представляет собой итерационное многократное выполнение относительно простых операций. Для достижения высокой производительности вычисления распараллеливают. Для решения этих задач очень часто используют современные ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы), которые содержат на кристалле значительные аппаратные ресурсы (логические ячейки, триггеры и другие), конфигурируемые для эффективного выполнения определенных задач, т.к. можно использовать все имеющиеся на схеме ресурсы и получать значительное превосходство над программной реализацией таких алгоритмов [1].

Разработанный криптоблок подбирает ключи в соответствии с начальной известной информацией. Т.к. для перебора одного ключа затрачивается относительно мало ресурсов, создается много одинаковых ядер до заполнения ПЛИС. Каждое ядро производит поиск ключа по заданной информации. Тем самым, разделив интервалы перебора ключа между ядрами, процесс поиска распараллеливается. Если определенные биты ключа уже известны, криптоблок не будет их перебирать, что сократит время на нахождение нужных ключей.

Ключи подбираются по уже известному (открытому) тексту. Открытый текст может быть известен как весь, так и по определенной маске. Ключ считается найденным, если выполняется условие:

$$(I \text{ xor } II) \text{ and } IM = 0$$

где I – расшифрованный криптоблоком текст, II – открытый текст, IM – маска известных битов открытого текста.

Процесс шифрования по алгоритму DES состоит из начальной перестановки, 16 циклов шифрования и конечной перестановки [2]. В связи с этим используется конвейер из 16 стадий. Все стадии независимы и на каждой в данный момент времени может происходить обработка одного из принятых сообщений.

Функции счетчиков перебираемых и найденных ключей выполняют встроенные в ПЛИС блоки DSP48E1 (digital signal processor). Это позволило поместить в ПЛИС большее число ядер.

Реализована система приостановки работы ядер при переполнении памяти подобранных ключей. Информация о количестве ключей, подобранных в каждом ядре, всегда доступна пользователю. Если найдено больше определенного числа ключей (число зависит от доступной памяти ПЛИС), то ядро приостанавливает перебор и подает сигнал переполнения. После считывания ключей ядро продолжает работу.

В случае реализации максимально возможного числа ядер используется более 90% ресурсов ПЛИС, что приводит к ее значительному нагреванию. В связи этим введена схема контроля температуры кристалла, которая останавливает работу ПЛИС при повышении температуры до определенного предельного значения. Работа возобновляется после понижения температуры до заданного уровня.

Разработанный криптоблок реализован на ПЛИС типа XC7K160T семейства Kintex-7.

Используемые ресурсы одного ядра (в скобках указан процент от общего количества в ПЛИС): LUT – 2997 (2,96%), FF – 2787 (1,37%), Memory LUT – 70 (2%), BRAM – 8 (2,46%), DSP48 – 4 (0,67%).

Удалось разместить 30 ядер, каждое из которых при тактовой частоте 250 МГц может перебирать $25 \cdot 10^7$ ключей в секунду.

Для примера, процессор Intel Core i7 6700K при тактовой частоте 4 ГГц может перебирать $5 \cdot 10^7$ ключей в секунду, проигрывая в производительности в 150 раз.

Список литературы

1. Kilts S.: Advanced FPGA Design. Architecture, Implementation, and Optimization // Wiley-IEEE Press, 2007. – 352 p.
2. “Data encryption standard (DES)”, National Bureau of Standards (U.S.), Federal Information Processing Standards Publication 46, National Technical Information Service, Springfield, VA, Apr. 1977.

Е.В. МАРЬИНА, Э.Ф. ИМАМЕТДИНОВ

Научный руководитель – А.А. КРАСНЮК, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ МОП-ТРАНЗИСТОРА С ПЕРИОДИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫМ КАНАЛОМ

Проводилось исследование зависимости термостабильной точки МОП-транзистора с периодически легированным каналом от величины легирования канала. Представлены результаты моделирования анализируемого транзистора и зависимости изменения точки термостабильности от нескольких параметров.

Исследование метода периодически легированного канала транзистора позволяет решить ряд проблем возникающих при разработке транзисторов для высокотемпературной микроэлектроники. Разработанная нами модель МОП-транзистора с периодически легированным каналом (PDCFET) позволяет выйти на новый технологический уровень при реализации микросхем, способных сохранять работоспособность при высоких температурах. На рис. 1 приведена структура моделируемого п-канального транзистора, на основании которого были проведены исследования выходных характеристик PDCFET.

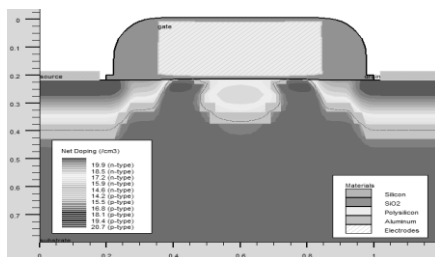


Рис.1. Структура моделируемого п-канального транзистора PDCFET

Данная структура реализуется с помощью дополнительной имплантации фосфора в подзатворную область. Вследствие такого преобразования, формируется так называемый «остров» р-типа, в результате чего, канал транзистора получает периодичную форму.

Одной из задач данной работы являлось нахождение зависимости термостабильности исследуемого транзистора от некоторых параметров. В

ходе работы был найден один из таких параметров, в большей степени влияющий на термостабильную точку. Им является доза имплантации фосфора. На рис. 2 показаны изменения точки термостабильности при разбросе величины дозы от 10^{11} до 10^{12} см $^{-2}$.

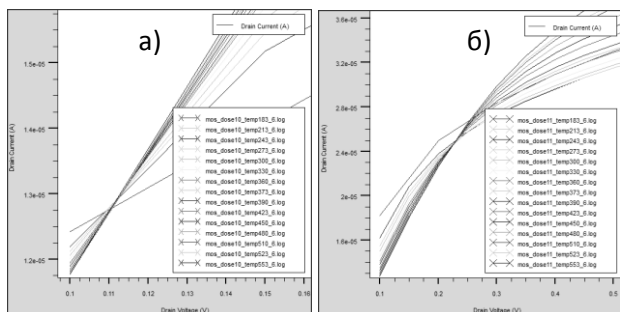


Рис.2. Сравнительные выходные характеристики PDCFET при разном напряжении на затворе при изменении дозы имплантации фосфора а) 10^{11} см $^{-2}$, б) 10^{12} см $^{-2}$

При исследовании других параметров особого влияния выявлено не было. К примеру, на рис. 3 показаны переходные характеристики транзистора при разных дозах имплантации фосфора при легировании р-областей под стоком и истоком транзистора. Данный параметр влияет только на пологость кривой зависимости I_c от U_c .

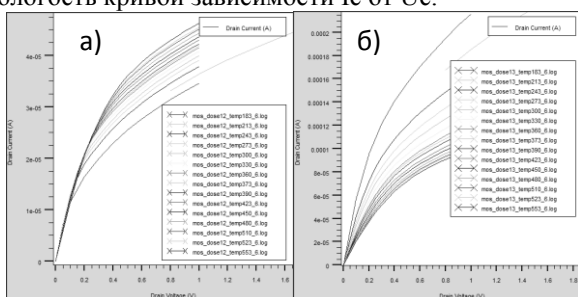


Рис.3. Переходные характеристики PDCFET при разных дозах имплантации фосфора при легировании р-областей под стоком и истоком, а) 10^{12} см $^{-2}$, б) 10^{13} см $^{-2}$

Работа выполняется при поддержке РФФИ, проект № 14-29-09207.

Список литературы

1. Краснюк А.А., Орлов О.М, Имамеддинов, Э.Ф. Марына Е.В. Разработка и моделирование субмикронных PDCFET транзисторов //Сб. науч. тр. под ред. А.И. Стемповского - М.:ИППМ РАН, 2014.

К.С. ЗЕМЦОВ

Научный руководитель – Г.И. ЗЕБРЕВ, д.т.н., профессор
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КОМПАКТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ СБОЕВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЗЧ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Показана неоднозначность традиционного метода приближенной оценки интенсивности сбоев с помощью «числа качества» (Figure-of-Merit) и предложена новая формула для расчёта.

Проблема множественных сбоев в схемах высокой степени интеграции ведёт к усложнению системы коррекции ошибок [1] и необходимости её оптимизации. Оптимизация алгоритма систем коррекции мягких ошибок (сбоев, SEU) предполагает необходимость аналитической компактной модели для расчета интенсивности сбоев в условиях космического пространства. Одним из возможных подходов такого рода является использование «числа качества» (Figure-of Merit, FOM), предложенного в работе [2]. Для описания зависимости сечения сбоя от линейной передачи энергии Λ (ЛПЭ) вместо неидеальной ступенчатой зависимости (кривая Вейбулла) используется идеальная ступенчатая функция $\theta(x)$ с пороговым ЛПЭ Λ_C и сечением насыщения σ_{SAT} : $\sigma(\Lambda) = \sigma_{SAT} \theta(\Lambda - \Lambda_C)$. Дифференциальный ЛПЭ спектр представляется степенной функцией $\phi(\Lambda) \equiv b/\Lambda^3$, где b – константа, зависящая от орбиты, что является хорошим приближением для $2 < \Lambda < 20$ МэВ-см²/мг. Тогда интенсивность мягких ошибок оценивается по формуле

$$R = \int_0^{\infty} \sigma(\Lambda) \phi(\Lambda) d\Lambda \equiv b \sigma_{SAT} \int_{\Lambda_C}^{\infty} \Lambda^{-3} d\Lambda = 0.5 \sigma_{SAT} b / \Lambda_C^2 = \sigma_{SAT} \Phi(\Lambda > \Lambda_C), \quad (1)$$

где $\Phi(\Lambda > \Lambda_C)$ интегральная плотность потока ионов с ЛПЭ больше критического значения Λ_C . Основным параметром этой формулы является сечение насыщения, однако зависимость сечения от ЛПЭ не насыщается при больших значениях ЛПЭ, что делает σ_{SAT} плохо определяемым параметром. В частности, значение σ_{SAT} в таких условиях зависит от максимального значения ЛПЭ ионов, используемых в испытании. Неоднознач-

ность определения параметров Вейбулла проиллюстрирована на рис.1. Видно, что один и тот же набор экспериментальных точек [3] может быть формально аппроксимирован удовлетворительным образом кривыми Вейбулла, для которых значения σ_{SAT} отличаются на порядок.

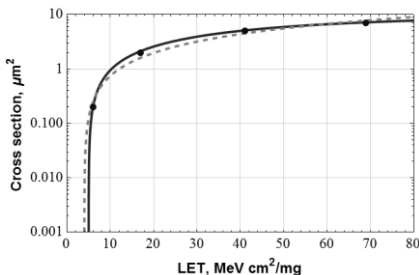


Рис. 1. Две кривые Вейбулла с различными параметрами практически одинаково хорошо описывают 4 экспериментальные точки [3]. Сплошная линия: $\sigma_{SAT} = 10 \text{ мкм}^2$, $\Lambda_C = 5 \text{ МэВ-см}^2/\text{мг}$, $W = 50 \text{ МэВ-см}^2/\text{мг}$, $s = 1$; штрих: $\sigma_{SAT} = 100 \text{ мкм}^2$, $\Lambda_C = 4 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$, $W = 800 \text{ МэВ см}^2/\text{мг}$, $s = 1$

Несмотря на то, что обе кривые почти неотличимы, формула Питерсена (1) дает различие оценки интенсивности почти на порядок. Таким образом, оценка интенсивности с помощью (1) может приводить к сильной неопределённости. Вместе с тем, при отсутствии насыщения зависимость сечения от ЛПЭ в надпороговом участке может быть аппроксимирована квазилинейной зависимостью $\sigma(\Lambda) \cong K_d (\Lambda - \Lambda_C)$, где K_d – наклон квазилинейного участка [4]. Тогда интеграл (1) принимает вид

$$R \cong b \frac{K_d}{2\Lambda_C} = b \frac{K_d \Lambda_C}{2\Lambda_C^2} = K_d \Lambda_C \Phi(\Lambda > \Lambda_C). \quad (2)$$

Параметр K_d является дифференциальной величиной, определяемой из наклона зависимости с погрешностью не более 20-30%, в отличие от асимптотической величины σ_{SAT} , которая может ошибаться в несколько раз.

Список литературы

1. J. Guo, L. Xiao, Z. Mao, Q. Zhao, "Enhanced Memory Reliability Against Multiple Cell Upsets Using Decimal Matrix Code," IEEE Trans. VLSI Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 127-135, 2013.
2. E. L. Petersen, J. B. Langworthy, and S. E. Diehl, "Suggested Single Event Upset Figure of Merit," IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 30, p. 4533, 1983.
3. В. В. Емельянов, А. И. Озеров, Р. Г. Усейнов, В. С. Анашин, «Оценка сечений множественных сбоев в КМОП СОЗУ по результатам экспериментов на ускорителях ТЗЧ», Доклад на Конференции «Стойкость-2013», Лыткарино, 2013.
4. G. I. Zebrev, M. S. Gorbunov, R. G. Useinov, V. V. Emeliyanov, A. I. Ozerov, V. S. Anashin, A. E. Kozyukov, K. S. Zemtsov, "Statistics and methodology of multiple cell upset characterization under heavy ion irradiation," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. A, Vol. 775, pp. 41-45, March 2015.

В.В. ДЕМЕНТЬЕВ^{1,2}

Научный руководитель – И.И. ШАГУРИН^{1,2}, д.т.н., профессор

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

²ЗАО НТЦ «Модуль», Москва

ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕЙЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ КОМАНД ПРОЦЕССОРА NM6407

В докладе описывается концепция модели процессорного ядра NMC4, имеющего архитектуру NeuroMatrix и содержащего 32-разрядный управляющий RISC модуль и матрично-векторные функциональные устройства для цифровой обработки данных (DSP). Ядра - основная часть процессора NM6407 (двухъядерная система), отвечающая за исполнение команд. Набор команд описывается на языке PDDL (processor and peripheral description language). Из этого описания компилятор PDDL генерирует декодер и дизассемблер инструкций на языке Си. Модель позволяет анализировать поведение конвейера процессора в зависимости от выполняемой программы (размещения в памяти, последовательности и сочетания инструкций). Результаты такого анализа дают возможность оценить эффективность работы конвейера и получить рекомендации по совершенствованию его структуры.

Процессор NM6407 является дальнейшим развитием семейства отечественных процессоров NeuroMatrix, разработанных ЗАО НТЦ "Модуль": Л1879ВМ1(NM6403), 1879ВМ2 (NM6404) и 1879ВМ4Я (NM6405) [1]. В отличие от предыдущих процессоров семейства, NM6407 содержит сопроцессор для обработки данных в формате с плавающей точкой. Язык PDDL [2] – это высокоуровневый Си-подобный язык описания архитектур ядер процессоров и периферийных устройств. С помощью этого языка ООО «РЕДА-Софт» разработало функциональный симулятор, предназначенный для эмуляции работы микропроцессоров NM6403, NM6405 и NM6407. Концепция языка PDDL дает возможность автоматизировать получение декодера набора команд и его дизассемблера для процессора с произвольной архитектурой. Язык PDDL позволяет реализовать функциональную модель, которая выполняет все инструкции за один такт, строго последовательно. Модель обеспечивает корректное выполнение программ, но не позволяет оценить реальное время их выполнения, т.е. не учитывает архитектурные особенности процессоров. Такая модель используется для отладки программного обеспечения, но не может служить для проверки эффективности новых архитектурных решений в процессе проектирования аппаратуры.

Благодаря тому, что PDDL описание транслируется в код на языке Си, можно улучшить точность модели с помощью реализации дополнительных структур данных и их обработки на языке Си, а также использовать готовые библиотеки языка SystemC. При этом PDDL используется для автоматической генерации декодера и дизассемблера инструкций, а алгоритмы работы конвейера и доступа к системе памяти реализуются отдельными программами на языке Си. Такой подход позволяет использовать все возможности языка Си/Си++ и при этом сохранить интерфейс для подключения внешнего программного отладчика и интерфейс для подключения модели системы памяти.

Разработанная модель описывает только часть двухъядерного процессора NM6407 - его процессорное ядро NMC4. Это управляющее RISC ядро (реализует конвейер) с матрично-векторными сопроцессорами (функциональные устройства - исполнительные стадии конвейера). Само ядро не содержит блоков памяти и периферийных устройств. Доступ к памяти (данные/команды) и периферийным устройствам осуществляет системный интегратор SI, который транслирует запросы ядра в соответствующие блоки памяти и возвращает ядру запрошенные данные/команды. Память реализована в виде нескольких внутренних блоков SRAM. С точки зрения ядра NMC4 запрос к памяти на получение данных устанавливается на ступени IR1 конвейера (команды выбираются блоком предвыборки IFU). Затем команда ожидает данных в очереди на второй ступени конвейера IR2, после чего переходит на исполнительные ступени конвейера IR3.

Модель основана на интерпретации инструкций и моделирует их конвейерное исполнение, что дает возможность анализировать поведение конвейера в зависимости от реализуемой программы. Такая модель может использоваться как при отладке программного обеспечения, так и для оценки эффективности использованных в процессоре аппаратных решений. Модульная структура модели обеспечивает возможности ее быстрой адаптации к следующим поколениям процессоров NeuroMatrix, что позволит в ходе их проектирования оценивать и сравнивать характеристики различных архитектурных вариантов для выбора оптимального решения.

Список литературы

1. Черников В.М., Вискне П.Е., Шелухин А.М., Черников А.В., Косоруков Д.Е. Новый отечественный процессор обработки сигналов 1879BM4 семейства NeuroMatrix® // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2010. С. 241-246.
2. Язык PDDL. Руководство разработчика. Версия 1.0. ООО "РЕДА-Софт", 2015.

Д.А. ДОМОЖАКОВ, Н.Ю. РАННЕВ

Научный руководитель – С.В. КОНДРАТЕНКО, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УСТРОЙСТВО КОРРЕКТИРОВКИ ФАЗ СИГНАЛОВ ДЛЯ МНОГОФАЗНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ УПРАВЛЯЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЕМ (ГУН)

Представлен вариант схемы для корректировки фаз сигналов для 4-х фазного ГУН, построенного на основе Current-Mode Logic (CML) – элементов.

Ряд высокочастотных интегральных схем используют набор тактовых сигналов, имеющих постоянную разницу фаз. Существуют генераторы клаковых импульсов (ГУН), производящие набор сигналов с последовательностью фаз, зависящей от начальных условий и режима работы устройства [1]. Подобная неоднозначность фаз сигналов может привести к нарушению работоспособности ИС и требует их стабилизации.

Критерием работоспособности четырёхфазного CML ГУН является разность фаз между сигналами, равная 90° (1 – 2 – 3 – 4 или 4 – 3 – 2 – 1). Характерная особенность таких генераторов – наличие пары противофазных сигналов (1 – 3 или 2 – 4).

Таким образом, если считать одну из пар сигналов фиксированными (1 – 3), то возможны лишь два случая последовательности сигналов: (1 – 2 – 3 – 4) или (1 – 4 – 3 – 2). Таким образом, в случае ошибки достаточно лишь поменять местами сигналы 2 и 4.

Общая схема корректировки для четырёх фазного CML ГУН представлена на рис.1. Для совместимости с уровнями генератора используются CML элементы [2].

В зависимости от того, какая последовательность фаз приходит на D – триггер, на его выходе ERR формируется логическая единица при правильной последовательности и логический ноль в случае ошибки. Далее этот сигнал подается на управляющие входы мультиплексора, который оставляет неизменным подключение сигналов 2 и 4 в случае $ERR = "1"$ или меняет их местами в случае $ERR = "0"$.

Для двух возможных случаев формирования сигналов ГУН проведено моделирование работы схемы, результаты которого представлены в таблице.

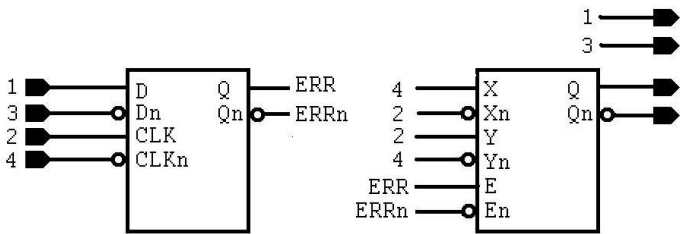


Рис. 1. Общая схема корректировки фаз CML ГУН

Таблица 1. Входные и выходные последовательности сигналов схемы корректировки

Последовательность сигналов на входе	1-2-3-4	1-4-2-3
Последовательность сигналов на выходе	1-2-3-4	1-2-3-4

Таким образом, согласно результатам моделирования, разработанная схема корректировки фаз ГУН коммутирует тактовые сигналы в зависимости от их последовательности, обеспечивая определённую последовательность фаз.

Список литературы

1. Pedram Sameni, Chris Siu, ShahriarMirabbasi, Hormoz Djahanshahi, Marwa Hamour, Krzysztof Iniewski and Jatinder Chana. Modeling and Characterization of VCOs with MOS Varactors for RF Transceivers //Hindawi Publishing Corporation, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006

2. Payam Heydari. Design and Analysis of Low-Voltage Current-Mode Logic Buffers //Department of Electrical and Computer Engineering University of California, 2003

Э.Ф. ИМАМЕТДИНОВ

Научный руководитель – А.О. ВЛАСОВ

Федеральный научный центр научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСХЕМЫ ПОДБОРОМ ВХОДНЫХ БИБЛИОТЕЧНЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ТЕХПРОЦЕССА 28 нм

Исследовалась зависимость статической мощности токов утечки от набора библиотек стандартных ячеек и памяти, используемых при проектировании микросхемы по техпроцессу TSMC 28нм.

Статическая мощность токов утечки определяется суммой токов утечки закрытых n и p канальных транзисторов при отсутствии тактирующих сигналов, когда схема находится в стабильном состоянии. Для технологических норм производства микросхем выше 65нм влияние токов в статическом состоянии можно считать пренебрежимо малым и не вкладывающим значительную роль на общую потребляемую мощность. Для технологических норм 65 нм влияние токов утечек становится существенным, а с дальнейшим уменьшением технологических размеров критичность параметра статической мощности возрастает [1].

На начальном этапе проектирования важным шагом является выбор набора технологических библиотек. Используя комбинированные типы библиотек можно снизить статическую мощность и увеличить быстродействие синтезируемого проекта [2]. На примере блоков **L2_cache** и **int_mult_div** микропроцессорного ядра сри, произведен анализ применения различных наборов технологических библиотек.

При синтезе использовались следующие типы наборов библиотек стандартных ячеек и блоков памяти по техпроцессу в 28 нм:

- **RVT(SVT)** Standard Threshold Voltage - вариант, построенный на базе транзисторов с неким стандартным значением порогового напряжения.
- **LVT** Low Threshold Voltage - вариант с пониженным значением порогового напряжения, обеспечивающий максимальное быстродействие проектируемого блока.
- **HVT** High Threshold Voltage - вариант с повышенным значением порогового напряжения, обладающий минимальными значениями статической мощности.

Также были рассмотрены библиотеки стандартных ячеек с разными длинами каналов: **L40, L35, L30**.

Библиотеки блоков памяти сравнивались на примере блока **L2_cache**, так как блок состоит в основном (90% площади) из макроблоков памяти. Результаты нормировались на параметры **RVT** варианта.

Таблица 1. Сравнение параметров блока **L2_cache**

L2_cache	Относительное быстродействие	Относительная статическая мощность токов утечки
LVT	8%	430%
HVT	-25%	-60%

Из полученных результатов можно сделать вывод, что применение **LVT** варианта памяти нецелесообразно из-за увеличения токов утечки более чем в 4 раза, при незначительном увеличении быстродействия. Для **HVT** варианта характерно ожидаемое существенное снижение мощности с потерей быстродействия.

Библиотеки стандартных ячеек сравнивались на примере блока **int_mult_div**, так как в нем отсутствуют макроблоки, и он полностью реализуем на стандартных ячейках. Результаты нормировались на параметры варианта, синтезируемого на **RVT** библиотеках с длиной канала **L30**.

Таблица 2. Сравнение параметров блока **int_mult_div**

int_mult_div	RVT L35	RVT L40	LVT L30	LVT L35	LVT L40	HVT L30	HVT L35	HVT L40
Быстродействие	-6%	-16%	45%	23%	0%	-27%	-33%	-41%
Мощность токов утечки	-85%	-95%	755%	5%	-76%	-94%	-96%	-96%

Из таблицы видно, применение **LVT** библиотек с одновременным увеличением длины канала позволило: в **L35** варианте увеличить быстродействие без увеличения статической мощности, и в **L40** - существенно снизить мощность токов утечки, без потери скорости функционирования. В остальном результаты соответствуют выводам для макроблоков памяти.

Таким образом, подбор библиотек позволяет получить эффективное соотношение параметров быстродействия и мощности.

Список литературы

1. Бобков, С.Г. "Высокопроизводительные вычислительные системы" ред. В. Б. Бегелин. - Москва : НИИСИ РАН, 2014.
2. Власов А.О. "Оптимизация потребляемой мощности микросхем с использованием транзисторов с разным пороговым напряжением" 13-я Российская научно-техническая конференция "Электроника, микро- и наноэлектроника" Сборник научных трудов, 2011, с.65-68

Н.С. СМЕРНИЦКИЙ

Научный руководитель – Д.С. ВЕСЕЛОВ, к.т.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Для современных продуктов МЭМС технологий, особенно для изделий специального назначения, все чаще предъявляются высокие требования к надёжности соединений диэлектрических материалов. Для таких соединений, в процессе формирования МЭМС структур и компоновки ИМС на этапах сборки и установки в корпус, в настоящее время применяются следующие способы: механические: соединения с применением специальных фиксаторов, склеиваемые соединения, паяные соединения; сварные: сварка, напылённых на поверхность диэлектриков, материалов, высокочастотная сварка. Механические способы не отличаются высокой технологичностью и не являются групповыми, что приводит к значительному удорожанию изделий. Зачастую они не позволяют получать соединения, удовлетворяющие требованиям надёжности, особенно для изделий малого размера и специального назначения [1]. Высокочастотная сварка диэлектрических материалов напрямую, без применения вспомогательных слоёв, усложняется необходимостью тщательного подбора параметров процесса, как для каждого свариваемого диэлектрика в отдельности, так и для их комбинации, в соответствии с факторами диэлектрических потерь материалов. Это значительно усложняет технологический процесс и повышает конечную стоимость изделий.

Соединение диэлектриков может также осуществляться посредством сваривания материалов, напылённых на их поверхность. Полученные таким образом соединения не отличаются надёжностью, так как критерием, в данном случае, является уровень адгезии плёнки напылённого материала к поверхности соединяемых диэлектриков. Глубина диффузии материала плёнки в диэлектрик в данном случае составит не более 1-2 атомарных слоёв, чего вполне достаточно для достижения хорошей адгезии плёнки к поверхности диэлектрика, но не достаточно для обеспечения надёжного соединения двух диэлектрических подложек [1,2].

В качестве альтернативы существующим способам в НИЯУ МИФИ на кафедре № 27 (Микро- и наноэлектроники) был предложен новый способ сварки диэлектрических материалов, суть которого сводится к осуществлению глубокой диффузии, напылённого на поверхность одного из образцов, металлического покрытия в соединяемые диэлектрические материалы (Рис. 1). Диффузия в месте контакта соединяемых материалов осуществляется путем переноса частиц металлического покрытия в диэлектрические материалы под воздействием сильного электрического поля.

Для этого сварка проводится в два этапа с изменением полярности электродов.

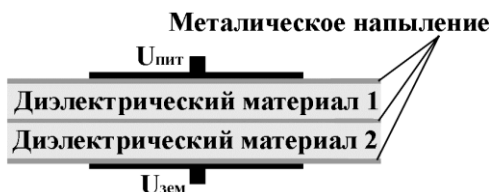


Рис. 1. Принципиальная схема сварки диэлектрических материалов

Проведено исследование процесса сварки двух ситалловых пластин разработанным способом. При этом использовалось металлическое алюминиевое покрытие толщиной около 100 нм, напыляемое на поверхность пластины магнетронным распылением. Формирование сварного соединения проводилось при подаче на электроды напряжения 5 кВ.

В процессе исследований выявлено, что для получения надёжного соединения, перед напылением металлического покрытия, для удаления загрязнений с поверхности соединяемых диэлектрических пластин сначала необходимо проводить химическую обработку пластин, а затем ионную очистку. Процессы диффузии необходимо проводить в вакууме, при давлении не более 10^{-5} Торр. При этом соединяемые материалы следует предварительно нагревать. Температура нагрева подбирается в зависимости от свариваемых материалов и может составлять 100-400°C.

Проведенные исследования выявили следующие преимущества разработанного способа перед существующими аналогами: возможность сваривать образцы малого размера (сварены образцы габаритным размером 2×2 мм), компактность сварного соединения (сварной шов не превышает толщины металлического покрытия, десятки нм), за счёт глубокой диффузии повышается надёжность соединения. Кроме того, разработанный способ сравнительно прост и является групповым.

Особенностью разработанного способа является необходимость тщательного подбора технологических режимов для каждого свариваемого материала в отдельности.

Список литературы

1. Николаев Г.А.. Сварка в машиностроении. // М.: Книга по Требованию, 2012. Том 1, глава 9 «Специальные виды сварки: Сварка в микроэлектронике», 495 с.
2. Фролов В.А., Пешков В.В., Коломенский А.Б. и др. Сварка. Введение в специальность. // М.: Альфа-М, 2013, 384 с.

Е.А. ДОВГОПОЛАЯ

Научный руководитель – В.В. МАСЛЕННИКОВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ СИСТЕМ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

Предложены простые приближенные формулы для оценки добротности систем, описываемых математической моделью не выше четвертого порядка. Обозначены границы применимости полученных результатов в рамках допустимой для грубых оценок погрешности в 20%.

Логическим продолжением работ [1], [2] и [3] является повышение степени рассматриваемого полинома. Поскольку при анализе колебательных систем одной из наиболее существенных характеристик является добротность, основное внимание было сфокусировано именно на ее оценке. Необходимые приближенные формулы были получены комбинированием коэффициентов исходного уравнения $ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0$ с использованием в качестве знаменателя одного из главных миноров матрицы Гурвица. В связи с этим предлагаются к использованию следующие оценки:

- если частоты действительных корней выше частоты комплексно-сопряженных, то добротность $q_0 \approx \frac{c\sqrt{ce}}{dc - be}$;
- если частоты действительных корней ниже частоты комплексно-сопряженных, то добротность $q_0 \approx \frac{c\sqrt{ac}}{bc - ad}$;
- если комплексно-сопряженных корней две пары, то $q_{01} \approx \frac{c\sqrt{ac}}{bc - ad} \square \frac{\sqrt{ac}}{b}$, а $q_{02} \approx \frac{c\sqrt{ce}}{dc - be} \square \frac{\sqrt{ce}}{d}$.

В ряде случаев хорошим критерием для выбора формул, рекомендуемых к использованию, выступает величина $Y = \frac{ad^2}{b^2e}$.

При этом получено, что:

- $Y \gg 1$, если частоты действительных корней выше частоты комплексно-сопряженных;

- $Y \ll 1$, если частоты действительных корней ниже частоты комплексно-сопряженных;
- $Y \approx 1$, если комплексно-сопряженных корней две пары.

Полученные формулы успешно применялись для анализа систем автоматического регулирования (совместно с использованием критерия $q_0 < 0.5$ для обеспечения квазиапериодического характера переходных процессов).

Список литературы

1. Масленников В.В. Метод приближенного определения корней кубического уравнения с положительными коэффициентами и комплексно-сопряженными корнями / Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». т. 2 – 2015. – с. 179 – 183.
2. Масленников В.В., Автушко В.П. Способы повышения точности приближенных формул определения корней кубического уравнения с комплексно-сопряженными корнями / Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», т. 4 – 2015. – с. 354 – 358.
3. Масленников В.В., Довгополая Е.А., Кочеткова И.А. Метод приближенного определения корней кубического уравнения с положительными коэффициентами / Научная сессия МИФИ - 2015. Сборник научных трудов. - 2015. - т. 2 - с. 260.

Н.О. ЧЕБАН, А.А. СУДАРЕВ

Научный руководитель – В.В. МАСЛЕННИКОВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**РАСШИРЕНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА АКТИВНЫХ
ЗВЕНЬЕВ ВТОРОГО ПОРЯДКА, ВЫПОЛНЕННЫХ
НА ОДНОМ ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ**

На примере двух схем, приведенных в [1], рассмотрена возможность существенного расширения частотного диапазона активных звеньев второго порядка, выполненных на одном операционном усилителе (ОУ). Это значительно расширяет возможности применения таких звеньев.

Известно, что с ростом частоты добротность активных звеньев второго порядка, выполненных на ОУ, растет, что приводит к их неустойчивости и возможной неустойчивости. Это вызвано влиянием частотных свойств ОУ. Вместе с тем, как показано в [1], добротность активных звеньев мо-

жет быть уменьшена с помощью введения в них корректирующих элементов, что позволяет компенсировать рост добротности на высоких частотах и тем самым расширить частотный диапазон.

В данной работе рассмотрены две схемы активных звеньев второго порядка (рис. 1).

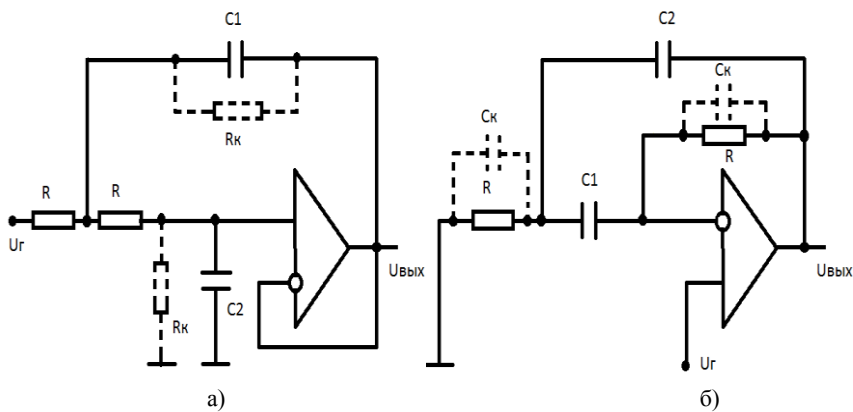


Рис. 1

Пунктирной линией на рисунке обозначены корректирующие элементы.

В результате расчета по приближенным формулам, приведенным в [2], были получены значения сопротивлений и емкостей корректирующих элементов. Использование корректирующих элементов позволяет в несколько раз расширить частотный диапазон активных звеньев, выполненных на ОУ.

Список литературы

1. Масленников В.В., Сироткин А.П. Избирательные RC-усилители. //Москва: Энергия, 1980, с.216.
2. Масленников В.В. Метод приближенного определения корней кубического уравнения с положительными коэффициентами и комплексно-сопряженными корнями. //Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2015, том IV, №2, с. 179-183.

А.В. ГАЙБУРА

Научный руководитель – Д.С. ВЕСЕЛОВ, к.т.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

В настоящее время в планарной технологии на различных этапах изготовления МЭМС структур наряду с плазмохимическими способами все чаще применяются процессы жидкостного травления кремния с повышением температуры. Они отличаются простотой и позволяют обеспечивать высокий уровень равномерности поверхности травления кремния. Но при этом характеризуются сложностью в стабилизации температуры и концентрации компонентов травителя, а также в обеспечении однородности состава травителя по всему объёму камеры травления.

Простейшим устройством стабилизации температуры и концентрации травителя при химическом травлении кремния является «водяная баня». Она представляет собой нагреваемый внешним устройством резервуар с теплоносителем, в котором располагается резервуар с травителем. Такое устройства отличается низким уровнем герметизации, что приводит к выпариванию компонентов травителя и неизбежному изменению его свойств. Также недостатком такого устройства является низкий уровень теплоизоляции, что становится причиной дестабилизации температуры в процессе травления, а как следствие оказывает негативное влияние на стабильность скорости травления и повышает шероховатость протравленной поверхности. Кроме того, для достижения требуемой однородности состава травителя в процессе травления необходимо постоянно обеспечивать его перемешивание [1].

Для этих целей в НИЯУ МИФИ на кафедре 27 было разработано устройство, представленное на Рис. 1. Оно состоит из теплоизоляционного корпуса 6, внешнего разогреваемого контура 8 с теплоносителем, внутренней камеры травления 10 для загрузки кассеты 14 [2], системы конденсации парогазовой взвеси 25, накопительной емкости 38 с водой. Во внешнем контуре расположен нагревательный элемент 17, работа которого контролируется по термопарам 9 и 13. Внешний контур оснащен каналом 20 с встроенным клапаном 18 и каналом 5 для слива и залива теплоносителя. Доступ в камеру травления осуществляется через теплоизолированную дверь 4 и герметичную дверь 2, на которой расположен привод 3 лопастей 1 для перемешивания травителя. Камера травления оснащена каналом 19 для слива травителя со встроенным клапаном 16. Устройство оснащено ёмкостью 33 с отверстием 21 для залива травителя, нагреваемого при помощи спирального нагревателя 32, контролируемого по термопаре 31. Травитель подается в камеру по каналу 34, а по каналу 39 из ёмкости 38 подается вода, температура которой поддерживается нагревателем 40, по термопаре 36.

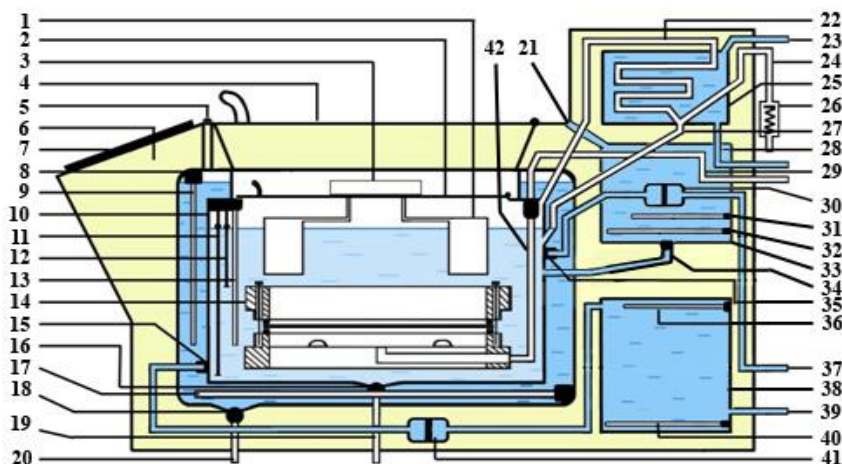


Рис. 1. Устройство для химического травления

По окончании травления вода подаётся насосом 41 через клапан 15 и контролируется датчиком уровня жидкости 12. С обратной стороны камеры находится водяной клапан 35, через который насосом 30 по каналу 37 из камеры вымывается травитель, процесс контролируется уровнемером жидкости 11. Из камеры травления по каналу 22 в систему конденсации отводится парогазовая взвесь, где пар конденсируется и по каналу 27 компоненты травителя возвращаются в камеру, а газ по каналу 24 с обратным клапаном 26, отводится из устройства. По каналу 28 в систему конденсации подаётся охладитель и выводится по каналу 23. При расположении кассеты 14 в камере травления канал 42 для отвода избыточного давления из кассеты подсоединяется к каналу 29. Для удобства работы управляющее оборудование выведено на приборную панель 7.

Разработанное устройство стабилизации температуры и концентрации травителя позволяет стабилизировать режимы травления, обеспечить равномерность доступа травителя к подложке, проводить плавный нагрев и охлаждение подложки на этапах её загрузки и извлечения из травителя.

Список литературы

1. Сауров А.Н. Методы самоформирования в микроэлектронике. // Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 05.27.01. М., 1999, 323 с.
2. Веселов Д.С. Механическое средство защиты для формирования микроэлектронных структур методом одностороннего химического травления. // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2011. Сборник аннотаций докладов – М., 2011, Том 1, с. 129.

Е.В. МАРЬИНА

Научный руководитель – А.О. ВЛАСОВ

Федеральный научный центр научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

АДАПТАЦИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМЫ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К 28 нм ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ НОРМАМ

Проведено исследование и решение проблем, возникающих при топологическом проектировании блока CPU при переходе от 65-нанометрового к 28-нанометровому технологическому процессу.

В данной статье рассматриваются проблемы, возникающие во время топологического проектировании при переходе технологических норм от 65 нм к 28 нм технологическому процессу. Исследование проводилось на примере микропроцессорного ядра (CPU) серии КОМДИВ, состоящего из нескольких функциональных подблоков `fpu`, `cpu_core`, `L2_cache` и `int_mult_div`.

Во время прохождения маршрута топологического проектирования исследуемого блока по технологическим нормам 28 нм пришлось столкнуться с рядом проблем. Одна из проблем, возникшая на первоначальном этапе проектирования, заключалась в изменении соотношения сторон макроблоков памяти: их вертикальные размеры, стали больше горизонтальных. Данные изменения связаны с особенностями размещения транзисторов и трассировки межсоединений 28 нм технологического процесса. Вследствие этого, пришлось прибегнуть к модификации существующего топологического размещения элементов микросхемы (Floorplan).

Так же в ходе исследования было обнаружено, что шины сетки земли/питания макроблоков памяти в четвертом металле горизонтальные, в то время как базовое направление четных металлов в доступном технологическом файле вертикальное. Такое построение осложняет подключение к сетке земли/питания всей микросхемы. Для решения этой проблемы была использована опция компилятора макроблоков памяти, реализующая верхний уровень земли/питания пятым горизонтальным металлом. Такая конфигурация верхнего металла сетки совпадает с базовыми направлениями слоев металлизации технологического файла, что обеспечивает эффективное подключение макроблока памяти к системе земли/питания блока CPU.

Другая проблема геометрического планирования размещения была связана с особенностями использования второго металла при реализации стандартных ячеек по 28 нм технологическому процессу. В них он используется для трассировки межсоединений и шин земли/питания. Данное обстоятельство, практически, лишает возможности его использования в процессе глобальной трассировки связей блока. Количество слоев металлизации, доступных для трассирования одинаково для 65 нм и 28 нм процессов. Таким образом, при 28нм нужно уменьшать локальную плотность стандартных ячеек для предотвращения проблем с трассировкой. Эту проблему также усугубляет «потеря» пятого металла для трассировки сигналов над макроблоками памяти, описанная выше. Так же для уменьшения плотности соединений элементов микросхемы некоторые из макроблоков памяти были расставлены в шахматном порядке.

На рис. 1,а показан Floorplan исследуемого блока выполненный по технологии 65 нм. Результатом данной работы является составленный Floorplan для технологического процесса 28 нм (рис. 1,б), удовлетворяющий вышеупомянутым требованиям по предотвращению проблем, связанных с переходом на новый технологический процесс.

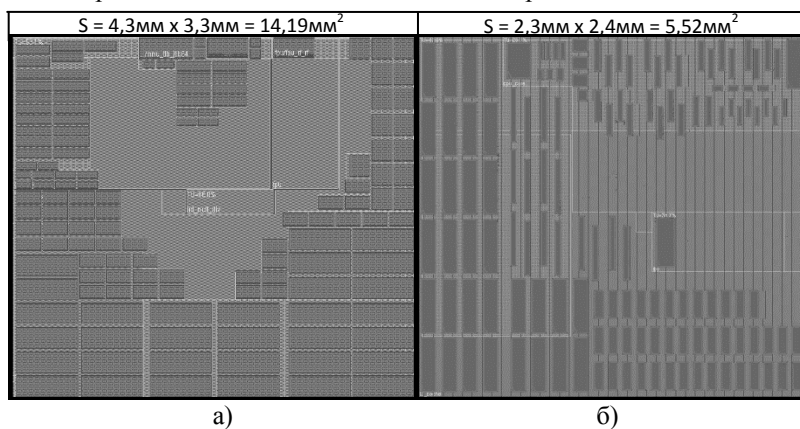


Рис. 1. Floorplan блока CPU по технологии 65 нм (рис.1,а)
и обновленный Floorplan блока CPU по технологии 28 нм (рис.1,б)

Список литературы

1. Encounter® Foundation Flows: Hierarchical Implementation Flow Guide. Product Version 8.1.1 March 2009.

МОЩНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРОФИЗИКА



О.А. БАЙКОВА

Научный руководитель – М.Н. СТРИХАНОВ, д.ф.-м.н., профессор

А.Ю. БАЙКОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЧАСТИ МОЩНОГО КЛИСТРОНА С КПД ОКОЛО 90 % ДЛЯ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СВЧ-ЭНЕРГИЮ

Представлены результаты моделирования мощных клистронов с КПД около 90%. Рассмотрены возможности разработки эскизного проекта мощного высокоэффективного клистрона для устройства преобразования электроэнергии в СВЧ-энергию.

В настоящее время мощные клистроны широко используются в различных областях радиоэлектроники, в частности, в радиолокационных станциях. Они также являются основными источниками СВЧ-энергии для мощных устройств, используемых в фундаментальной науке, – для радиотелескопов и ускорителей элементарных частиц. Области использования СВЧ-энергии в различных областях технической инфраструктуры современного общества все время расширяются. Так, появляются промышленные технологии, основанные на объемном СВЧ-нагреве, например, технологии получения искусственного песчаника из измельченного песка и технологии производства пеностекла. Еще одной перспективной современной тенденцией использования СВЧ-энергии является СВЧ-энергетика, связанная с непосредственным преобразованием электрической энергии в СВЧ и с передачей когерентного СВЧ-излучения на большие расстояния. Таким образом могут передаваться большие мощности в отдаленные труднодоступные районы Земли, а также возможна передача энергии космическим аппаратам, а в перспективе – передача на Землю значительных объемов энергии от орбитальных систем солнечных батарей. Как традиционные области применения мощных клистронов, так и (в особенности!) области применения, связанные с промышленными технологиями и с СВЧ-энергетикой, требуют высокого КПД преобразования электрической энергии в СВЧ-энергию.

В результате проведенных исследований [1]-[4] показано, что возможно создание мощных и сверхмощных клистронов с КПД до 90 %.

Это оказалось возможным благодаря исследованному и защищенному в 2013г. в диссертационной работе методу волнообразного группирования, позволяющему достигнуть предельных значений КПД в клистронах, а также в результате использования авторских компьютерных программ, основанных на оригинальных методах моделирования процессов взаимодействия электронных пучков с электромагнитными полями, включая дискретно-аналитическую модель группирования электронного пучка. Использование этих программ позволяет проводить исчерпывающую оптимизацию в широкой области полного пространства параметров (15-20 параметров), что недоступно никаким из известных в мире программ. Далее предполагается применить этот метод для проектирования функциональной части (области группирования и отбора энергии) конкретного сверхмощного клистрона непрерывного режима на частоту 800 МГц с выходной мощностью 1 МВт, который может быть использован как преобразователь электроэнергии в СВЧ-энергию в широкой области применений, включая питание мощных коллайдеров, промышленные СВЧ-технологии и СВЧ-энергетику.

Предполагается провести выбор базовых параметров, поэтапную оптимизацию в широкой области пространства параметров, 2D и 3D моделирование оптимального варианта и эскизное проектирование прибора. Полученный в результате эскизный проект должен стать ядром для разработки такого прибора (полная стоимость разработки по существующим ценам мировых фирм-производителей составляет от 1.5 до 5 миллионов долларов).

Список литературы

1. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н., Тищенко А.А. Математическая модель трансформации электронного пучка в узкой трубе. ЖТФ, 2012, том 82, вып. 6., С. 90 – 100.
2. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н. Исследование зависимости максимального КПД от коэффициента усиления в двухрезонаторных клистронах. ЖТФ, 2013, Т. 83, вып.4, с.127-133.
3. Байков А.Ю., Грушина О.А., Стриханов М.Н. Моделирование условий достижения максимального КПД в клистронах дециметрового диапазона. ЖТФ, 2014, том 84, вып.3.
4. Байков А.Ю., Грушина О.А. Модель трансформации электронного пучка в узкой трубе и ее применение для проектирования мощных клистронов. - М.:МФЮА, 2013. - 101с.

С.Г. КЛАДКО

Научный руководитель – Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ИОННОГО ИСТОЧНИКА ГАЗОВОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ

На примере ионного источника (ИИ) газовой нейтронной трубке (ГНТ), разработанной в ВНИИА им. Н.Л. Духова, рассмотрена оптимизация её рабочих параметров с целью уменьшения фронта импульса ионного тока и, как следствие, снижение стоимости каротажных работ, за счёт снижения ошибки диагностики в несколько раз.

В НИЯУ МИФИ на кафедре «Электротехника» при совместном сотрудничестве с ВНИИА им. Н.Л. Духова в рамках работы, поддержанной Министерством науки и образования РФ, были оптимизированы рабочие параметры ИИ ГНТ, которые позволили сократить время фронта импульса ионного тока. Оптимизация рабочих параметров проводилась с помощью кода КАРАТ [1].

Опыт работы показал, что разработчикам Нейтронных Генераторов (НГ) на основе газонаполненных трубок (ГНТ) приходится решать крайне сложные задачи для удовлетворения жестких требований к выходу нейтронов, повышения ресурса и т.д. При этом решение данных задач главным образом связано с экспериментами и/или технологическими подходами.

В этой связи для решения существующих проблем с традиционными методами целесообразно использовать возможности физического исследования работы ГНТ. При сохранении адекватности модели это подхода резко поднять качество оптимизации конструкции ГНТ.

По принципу работы данные устройства представляют собой линейный ускоритель ионов, на выходе которого расположена мишень. Генерация нейтронов происходит в результате реакции $D(d,n)He^3$, $T(d,n)He^4$ на мишени. Ключевым элементом ГНТ является источник ионов.

Основной задачей исследования работы ИИ ГНТ, является уменьшения времени фронта импульса ионного тока.

Ионы в ИИ образуются в результате процесса ионизации электронами нейтрального газа в скрещенных электрическом и магнитном полях. ИИ работает при низком давлении 10^{-3} (мм.рт.ст), что влияет на процессы формирования области разряда.

Пути решения задачи основывались на аналитическом представлении процесса ионизации. Для простоты рассматривались соотношения между 2 величинами: частота рождения и частота ухода частиц. В качестве частоты рождения частиц принята частота ионизации газа

В качестве частоты ухода частиц примем частоту ухода на анод электронов в следствии их дрейфа.

Выход на стационар определяется равенством частот рождения и ухода и свидетельствует о завершение переходного процесса.

При этом полагаем, что механизм ускорения электронов по всему объёму идентичен

Из данного равенства следует утверждение, что существуют рабочие параметры, при которых система сразу выходит на стационар. Данное предположение подтверждено неоднократным моделированием.

Полученное равенство частот представляет собой в явном виде уравнение в частных производных, которое зависит от трёх переменных: электрического поля, магнитного поля, начальной концентрации рабочего газа. Следует отметить, что данное равенство не зависит от начальной концентрации свободных носителей (электронов).

Рассмотрим основные зависимости при изменении только одного из трёх параметров.

1. Изменение r : происходит линейный рост частоты ионизации, отметим, что процесс происходит на одной ветви Пашена. На частоту ухода частиц ничего не влияет и она остается постоянной. Так, если отношение E к V будет достаточно большим, то для достижения стационара необходимо вкачивать большую концентрацию газа, что приведёт к лавинному образованию разряда и как следствие большим токам источника

2. Изменение V : обратно пропорциональная зависимость в частоте ухода частиц. Следовательно, при получении достаточного количества частиц в системе можно обойтись ограничением по величине магнитным полем.

3. Изменение U : изменение электрического поля является довольно сложной зависимостью, во-первых из-за нелинейных зависимостей частоты рождения частиц, во-вторых, в формуле (1) U рассматривается U как разность потенциалов, а это сильно влияет от геометрического положения частицы.

Моделирование показало, что при изменении только одного параметра возможно найти условие стационара. Однако моделирование показало области в которых возможно изменять параметры. Напряжение необхо-

димо изменять от 1000 до 3000 В, магнитное поле от 700 до 1200 Гс, давление рабочего газа от 10^{-3} до 10^{-2} мм.рт.ст

Отметим также, что образование стационара в зависимость ионного тока от времени условие равенства частот рождения и ухода электронов является необходимым, но недостаточным условием. Необходимо получить и само заданное значение тока, обусловленное нейтронным выходом (что составляет 200-300 мкА).

Процесс создания плазмы занимает относительно длительное время и сравнимо с длительностью импульса порядка нескольких микросекунд. Это связано с низким давлением рабочего газа и с относительно большим периодом ионизации.

Для уменьшения времени наработки заряда рассматривались 2 пути решения. Первый путь, т.н. «быстрый старт», который заключается в моментальной генерации больших концентраций свободных носителей (электронов). Данный путь возможно реализовать технически, с помощью искрового разряда, либо использование термо- или автокатада. Выбор технической реализации зависит от стоимости и необходимого ресурса работы ИИ ГНТ.

Моделирование показало, что при начальной концентрации электронов равной 10^9 см^{-3} и начальных рабочих параметров, рассчитанных на стационарный процесс, получаем стабильный импульс ионного тока, значение которого соответствует 200 мкА.

В результате данной работы определены диапазоны рабочих параметров ИИ ГНТ. Показано аналитическое рассмотрение нахождения условий стационарного разряда. Отмечено, что стационарный процесс не зависит от начальной концентрации свободных носителей, следовательно время фронта напрямую связано с временем наработки необходимой концентрации электронов.

Дальнейшее развитие связано с развитием методик т.н. «быстрого старта» – позволяющих получать необходимую концентрацию электронов практически сразу.

Список литературы

1. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA, Berkeley Research Associates, Inc. 1992.
2. Бессарабский Ю.Г., Битулев А.А., Бобылев В.Т. и др. // Сборник материалов Международной научно-технической конференции "Портативные генераторы нейтронов и технологии на их основе", Москва, 2004. С. 72.
3. Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

М.А. АЛХИМОВА

Научные руководители – С.А. САВЁЛОВ¹, д.ф.-м.н., профессор

С.А. ПИКУЗ^{1,2}, к.ф.-м.н., научный сотрудник

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Объединённый институт высоких температур РАН, Москва

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВЕРХЪЯРКОГО ИСТОЧНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ В ПЛОТНОЙ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Представлен анализ спектров сверхъяркого источника рентгеновского излучения ($I_{x\text{-ray}} \sim 10^{19}$ Вт/см²) генерируемого в плотной релятивистской плазме в режиме доминирования радиационных процессов, формируемой при облучении тонких Al фольг лазерным импульсом петаваттной мощности.

Плазма, генерируемая при взаимодействии лазерного излучения петаваттной мощности и интенсивности $I_{\text{laser}} \sim 3 \cdot 10^{21}$ Вт/см², является ярким полихроматическим источником рентгеновского излучения (далее РИ), с интенсивностью, достигающей $I_{x\text{-ray}} \sim 10^{19}$ Вт/см². Такие источники РИ находят широкое применение в медицине и онкологии, визуализации биологических процессов, материаловедении и фундаментных вопросах лабораторной астрофизики, и исследованиях экстремальных состояний вещества. Отметим что, стоимость таких источников на порядок дешевле, чем источников синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах, а достижимая плотность РИ на порядок выше, чем достигнутая для лазера на свободных электронах.

Было показано [1], что сверхяркий источник РИ первоначально формируется в плотной горячей бесстолкновительной плазме, создаваемой в фокальном пятне лазерного пучка и затем, в результате переноса энергии быстрыми электронами (с энергиями ~ 4 МэВ), генерируемыми в горячей области плазмы, и теплового транспорта в твердотельной мишени - в периферийной плазменной зоне происходит генерация вторичного мягкого РИ, с энергиями ~ 10 кэВ, в результате которого идет образование КК и КL - полых ионов, т.е. атомов с двумя вакансиями на К и L оболочках [2-

4]. В периферийной плазме наблюдается нелинейный рост мощности РИ и показано, что предел конвертации энергии лазерного излучения в энергию рентгеновского излучения пока не достигнут [5].

В данной работе представлены недавние результаты спектральной диагностики рентгеновского излучения, полученные при проведении экспериментальных исследований на лазерном комплексе петаватт класса - Vulcan PW (Лаборатория Резерфорда, Великобритания). Лазерный луч с интенсивностью $I_{\text{laser}} \sim 3 \cdot 10^{21}$ Вт/см⁻² и длительностью $\tau = 0.7$ пс фокусировался на поверхности мишени под углом 40° в фокальное пятно $d = 5$ мкм, в котором было сосредоточено около 35% всей энергии. В качестве мишеней использовали алюминиевые и кремниевые фольги, толщиной $h = 1 \div 2$ мкм. Для диагностики спектрального состава РИ применялась система из пяти спектрографов с диспергирующим элементом на основе кристалла (слюда и альфа-кварц) с высоким пространственным разрешением, расположенных попарно симметрично, для наблюдения спектров с фронтальной и тыльной поверхностей мишени на разном расстоянии от источника РИ. В качестве детектирующих элементов применялись ИР-пластины и Andor CCD камера.

Показано, что эффективная схема регистрации РИ позволяет получить полные спектры излучения плазмы с передней и задней поверхностей мишени в широком спектральном диапазоне длин волн: от 4 до 9 Å, содержащем резонансные и рекомбинационные линии H и He-подобных ионов и нейтральную K_α .

Список литературы

1. M. Nishiuch et al.: **22**, 033107 (2015).
2. J. Colgan et al., PRL **110**, 125001 (2013).
3. S.A. Pikuz et al., HEDP **9**, 560 (2013).
4. S.B. Hansen et al., Phys. Plasma **21**, 031213(2014).
5. A. Ya. Faenov et al., Scientific reports, Nature, i: 10.1038/srep13436 (2015).

В.С. ЕФИМОВ, А.Г. ПОСКАКАЛОВ

Научный руководитель – А.А. ПИСАРЕВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В ВОЛЬФРАМОВОМ «ПУХЕ» МЕТОДОМ ТЕРМОДЕСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Была измерена концентрация гелия в наноструктуре типа «вольфрамовый пух» с помощью термодесорбционной спектроскопии (ТДС). Сильно развитая наноструктура была сформирована на поверхности вольфрама под действием интенсивного плазменного облучения при температуре 1473 К. Концентрация гелия была получена исходя из уменьшения накопления гелия после удаления слоя «пуха». Удаленный слой содержал около 60 % общего количества захваченного гелия, а концентрация гелия была оценена на уровне 13 ат. %.

В ряде экспериментов на линейных плазменных симуляторах [1,2] было показано, что при облучении большими потоками гелиевой плазмы поверхности вольфрама при температуре 1000–1200 °С наблюдается рост специфического наноструктурированного слоя, состоящего из тонких переплетенных вольфрамовых нитей толщиной несколько десятков нанометров и длиной до нескольких микрометров. Внутри нитей наблюдается множество гелиевых пузырей. В литературе эта структура называется вольфрамовым «пухом» (fuzz). Аналогичные структуры были получены и на других материалах. При сформированном вольфрамовом пухе, для поверхности существенно меняются важные свойства материала, такие как излучательная способность, коэффициент распыления, теплопроводность и др. С одной стороны, подобные наноструктуры могут с огромной пользой применяться в электронике. С другой стороны, применительно к управляемому термоядерному синтезу, что для нас имеет приоритетное направление, данная структура может оказать негативное воздействие, существенно увеличивая эрозию обращенного к плазме материала. Поэтому изучение механизмов роста этой наноструктуры является очень перспективным.

Существует несколько моделей, описывающих рост этой структуры [3–6]. Различные процессы играют огромную роль при формировании «пуха». Одним из критических параметров в этих моделях является высокая концентрация гелия в поверхностном слое, при которой начинается рост

пуха. Согласно вычислениям, полученным с помощью молекулярной динамики [6], эта концентрация должна превышать 10 ат. %.

Несмотря на интенсивное изучение этого явления, на данный момент существует только одна работа, в которой приводятся данные о концентрации гелия в этих структурах. Согласно оценкам [7], концентрация гелия в вольфрамовом пухе на уровне нескольких атомных процентов. Эти данные не очень хорошо согласуются с рядом теоретических моделей.

В данной работе концентрация гелия в вольфрамовом пухе определялась методом термодесорбционной спектроскопии. Образец вольфрама толщиной 25 мкм, на котором был сформирован слой вольфрамового пуха при облучении гелиевой плазмой дозой 1×10^{27} He/м² при температуре 1200 °С, был разломан на несколько частей. Содержание гелия в одном из них было определено без предварительной подготовки. На втором образце слой вольфрамового пуха был удален механически. Из сравнения содержания гелия в образцах было определено интегральное содержание гелия в удаленном слое. Из массы удаленного слоя, полученной взвешиванием, было определено количество вольфрама. Согласно полученным данным, содержание гелия в вольфрамовом пухе было оценено на уровне 13 ат. %, что существенно больше чем в [7].

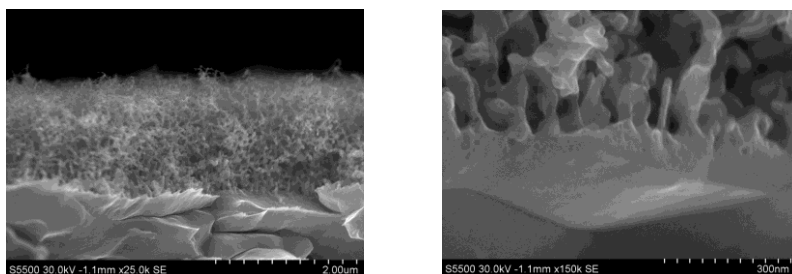


Рис. 1. SEM фотографии наноструктуры типа «вольфрамовый пух» с разным увеличением после выдержки в гелиевой плазме при температуре 1473К

Список литературы

1. M.J. Baldwin and R.P. Doerner, Nucl. Fusion 48 (2008) 035001.
2. S.Kajita et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 095005
3. S. Kajita, N. Yoshida, R. Yoshihara et al., J.Nucl.Mater, 418 (2011) 152-158.
4. S. Krashenninnikov, Phys. Scr. T145 (2011) 014040.
5. Yu.V. Martynenko and M.Yu. Nagel'. Plasma Physics Reports, 2012, Vol. 38, No. 12,
6. R.D. Smirnov and S.I. Krashenninnikov, Nucl. Fusion 53 (2013) 082002.
7. K.B. Woller, D.G. Whyte, G.M. Wright. Journal of Nuclear Materials, 463 (2015) 289–293.

Е.Д. ФИЛИППОВ

Научный руководитель – А.С. САВЁЛОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СОЗДАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА – ЦЕНДЕРА ДЛЯ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА МИШЕНИ И ИССЛЕДОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Создана установка для исследования модифицированных поверхностей различных материалов на основе интерферометра Маха – Цендера и малоомощного азотного лазера. Отработана методика исследования на различных материалах: алюминий, медь, железо. Выполнено исследование и оценка использования медной мишени с модифицированной поверхностью. Показано значительное увеличение плотности плазмы.

Абляции вещества под воздействием мощного импульсного лазерного излучения широко используется в научных и технологических целях: обработка поверхности материалов; создание неравновесной плазмы; осаждение пленок; создание высокого разряда ионов; создание электрического поля высокой интенсивности; исследования лазерного термоядерного синтеза и других [1-5]. Так, один из основных методов выравнивания неоднородностей интенсивности лазерного излучения основан на использовании динамической плазменной фазовой пластины (ДПФП), представлявшей собой облако нестационарной лазерной плазмы, через которое пропусклся лазерный пучок с целью его пространственно-временного сглаживания. *Цель данной работы* заключается в исследовании такой лазерной плазмы от различных мишеней. Кроме того, исследование профиля плотности плазмы является основополагающим для понимания физических процессов в лазерной плазме.

Мощный Nd-лазер (длина волны 1.054 мкм, энергия в импульсе порядка 20 Дж, длительность импульса ≈ 15 нс) использовался для создания лазерной плазмы. Импульс зондирующего лазера проходил через лазериндуцированной плазмы с задержкой $t_d \approx 5\div 50$ нс. Плотность лазерной мощности на мишени $q \approx 10^{12}$ Вт/см². Лазерный луч был сфокусирован на мишень, которая была помещена в вакуумную камеру с остаточным давлением $\approx 10^{-3}$ Па. Для анализа лазерной плазмы в данной работе применена схема с интерферометром Маха – Цендера, конструкция которого позволяет гибко изменять размеры и геометрию оптической схемы измерений. В

качестве осветителя (зондирующего пучка) выбрана коммерческая модель ультрафиолетового азотного лазера (длина волны 337 нм, энергия ~ 150 мкДж, длительность ~ 5 нс). Система регистрации построена на основе цифровой фотокамеры, для которой была успешно опробована технология удаления всех защитных фильтров перед ПЗС матрицей. Перед ПЗС матрицей устанавливался интерференционный фильтр ($\lambda \sim 337$ нм, FWHM $\Delta\lambda = 6$ нм, $T = 40\%$) и оптическая линза с $f=50$ мм.

Получена достаточно равномерная пространственная структура поля излучения азотного лазера в распределении интенсивности с преобладанием наиболее интенсивного излучения в центральной области и монотонным спадом в периферийных областях изображения. Получены теневые и интерферометрические изображения начальной стадии лазерной плазмы в режиме слабого поглощения материала мишени.

Исследована лазерная плазма при взаимодействии лазерного излучения с мишенью из поликарбоната при различных задержках азотного лазера. Хорошо наблюдаются малые возмущения с линейной плотностью плазмы порядка $N_e \cdot l \approx (1-2) \cdot 10^{-17}$ см $^{-2}$. Небольшие плотности свидетельствуют о слабом поглощении мишенью «греющего» лазерного импульса и формировании достаточно разреженной плазмы, соответствующей концепции модели динамической плазменной фазовой пластины. Исследована лазерная плазма при взаимодействии лазерного излучения с мишенью из железа. При использовании железной мишени видно гораздо более выраженную (порядка четырех) искривленность интерференционных полос с линейной плотностью плазмы порядка $N_e \cdot l \approx (4-5) \cdot 10^{-17}$ см $^{-2}$.

Представлены результаты интерферометрических измерений плотности электронов в лазерно-индуцированной плазме из медной мишени и медной мишени с модифицированной поверхностью, на которой были выращены конусы. Показано повышение температурных и плотностных характеристик плазмы в зависимости от эмиссионных параметров материала.

Список литературы

1. V.I. Mazhukin, V.V. Nossov, I. Smurov, Applied Surface Science. 253 (2007) p.7686
2. N.M. Bulgakova, A.B. Evtushenko, Yu.G. Shukhova et al, Applied Surface Science, 257 (2011) 10876–10882.
3. N. Gambino, P. Hayden, D. Mascali et al, Applied Surface Science, 272 (2013) 69–75.
4. N.G. Borisenko, A.E. Bugrov, I.N. Burdonskiy et al, Laser and Particle Beams 26, № 4 (2008) 537–543.
5. S.G. Garanin, Phys. Usp., 54 (2011) 415–421.

И.Г. ГРИГОРЬЕВА

Научный руководитель – С.А. САВЁЛОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КООРДИНАТНО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Описана методика и приведены результаты измерений спектральных характеристик источников рентгеновского излучения плазменного объекта образованного на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра». Исследования проведены при помощи разработанного и созданного координатно-чувствительного спектрометра импульсного рентгеновского излучения плазмы.

В НИЯУ МИФИ на кафедре «Физика плазмы» были проведены исследования пространственной структуры плазменного объекта в диапазоне рентгеновского излучения, образованного на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра».

Эксперименты по исследованию пространственной структуры плазменного объекта проводятся методом фотографирования плазмы в рентгеновских лучах с помощью камеры-обскуры, позволяющие получить изображение плазменного объекта. Для понимания физических процессов, происходящих в плазме, необходимо измерить спектр импульсного рентгеновского излучения из исследуемых областей плазменного объекта.

Для измерения спектра высокоинтенсивного, импульсного рентгеновского излучения из исследуемых областей плазмы был разработан и создан координатно-чувствительный детектор на основе термоллюминесцентных детекторов LiF, позволяющий измерять спектр импульсного рентгеновского излучения различных источников в плазменном объекте в диапазоне энергий 1–30 кэВ с координатным разрешением порядка 2 мм [1]. Прибор регистрировал изображение плазменного объекта в рентгеновских лучах за камерой обскуры.

Конструктивно детектор представлял собой пластину толщиной 10 мм, выполненную из стали, в которой имелись отверстия. В отверстия вставлялись сборки из десяти термоллюминесцентных детекторов LiF, размер одного термоллюминесцентного детектора – $\varnothing$ 2 мм и высота 0,9 мм.

Для измерения спектра рентгеновского излучения в ячейке использовался метод фильтров поглощения. По информации о поглощенной энергии в различных термолюминесцентных детекторах одной сборки можно математическими методами восстановить спектр рентгеновского излучения, зарегистрированного в данном месте.

В ходе экспериментов по исследованию пространственной структуры плазменных объектов на установке «низкоиндуктивная вакуумная искра» были получены спектры импульсного рентгеновского излучения из основных излучающих областей рис.1 (плазменная точка, приэлектродная плазма, анод) плазменного объекта, полученного при сильноточном импульсном электрическом разряде при токе 150 кА, плазма образована из паров железа. Спектр рентгеновского излучения «плазменной точки» отличается от спектра приэлектродной плазмы и электрода в области энергий рентгеновских квантов $h\nu < 3$ кэВ. Увеличение интенсивности мягкой компоненты рентгеновского излучения происходит за счет увеличения доли рекомбинационного рентгеновского излучения многократно ионизированных ионов плазмы.

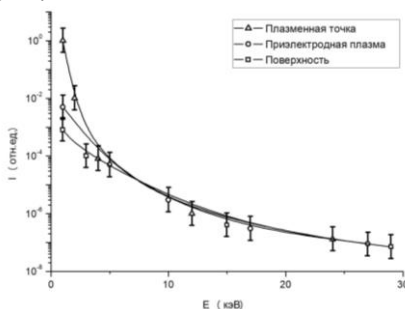


Рис. 1. Спектры импульсного рентгеновского излучения из основных излучающих областей (плазменная точка, приэлектродная плазма, поверхность анода) плазменного объекта, полученного при сильноточном импульсном электрическом разряде при токе 150 кА, плазма образована из паров железа

Вид спектра примерно одинаков в диапазоне энергий квантов 5–30 кэВ для всех излучающих областей разряда. Это говорит о том, что энергетические спектры ускоренных электронов, присутствующих в плазме микропинча, приэлектродной плазме и бомбардирующих поверхность электрода, аналогичны.

Список литературы

1. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. //ПТЭ. 2015. №6. С. 67-70.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ



А.Н. МОРОЗ

Научный руководитель – В.А. КАШУРНИКОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В СЛОИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ ВТОРОГО РОДА

Проведены исследования различных сверхпроводящих образцов методом стохастического математического моделирования (метод Монте-Карло). Получены кривые намагниченности в зависимости от числа дефектов в образце и температуры. Продемонстрировано температурное поведение вихревой решетки.

В настоящее время особое внимание уделяется изучению сверхпроводников второго рода. Поведение их намагниченности в зависимости от внешнего магнитного поля является важным инструментом для определения верхнего и нижнего значений критического поля, а также плотности критического тока. Поэтому важной задачей является исследование и расчет зависимостей намагниченности различных типов сверхпроводников второго рода от внешнего магнитного поля, концентрации дефектов и температуры.

Аналитическое решение задачи о динамике процессов, происходящих в сверхпроводнике, требует особого подхода. Для учета необходимого количества параметров наиболее привлекателен метод Монте-Карло, использованный в работах [1.-4.]. Ввиду того, что в указанных работах был исследован только один сверхпроводящий материал ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$), возникает интерес в численном исследовании других реально известных сверхпроводников с возможностью их сопоставления друг с другом. Поэтому целью данной работы является исследование зависимостей намагниченности различных сверхпроводников второго рода от температуры, внешнего магнитного поля и концентрации дефектов.

Были получены кривые намагниченности девяти сверхпроводящих бездефектных образцов. По характеру рисунка можно определить основные различия в свойствах исследуемых сверхпроводящих материалов. Это величины, характеризующие значения верхнего и нижнего критического поля. Полученные расчетные результаты согласуются с теоретическими и экспериментальными данными.

Наименьшее значение нижнего критического поля (H_{c1}) из девяти исследованных образцов соответствует сверхпроводнику LSCO, наибольшее – образцу из дигирида магния (MgB_2).

Наличие или отсутствие дефектов в образце значительно влияет на форму кривой намагничивания. Зацепленные на дефектах вихри остаются на них даже при уменьшении внешнего магнитного поля до нуля, создавая таким образом остаточную намагниченность. Так как в нашем случае на каждом дефекте может зацепиться только один вихрь, то конечное число вихрей примерно совпадает с числом дефектов и определяет тем самым величину остаточной намагниченности.

Были получены кривые намагниченности для шести различных сверхпроводящих образцов с числом дефектов, равным 200, 400, 500 и 700, расположенных по образцу случайным образом.

Так как энергия вихря определяется параметрами сверхпроводника, в котором он находится, при одних и тех же конфигурациях дефектов разные вещества ведут себя при перемагничивании по-разному. Так, согласно полученным расчетам, образцы YBCO и MgB_2 не демонстрируют особых изменений в процессах перемагничивания при количестве дефектов, равном 100-300, а некоторые образцы из данных материалов не имеют остаточной намагниченности даже при 700 дефектах.

Это можно объяснить тем, что ввиду малой глубины проникновения магнитного поля λ энергия вихрей превышает глубину потенциальной ямы дефекта, следовательно, в какой-то момент времени вихрям, зацепленным дефектами, энергетически выгодно с них соскочить и уничтожиться. Были определены образцы с наилучшими и наихудшими сверхпроводящими свойствами. Расчетным путем оценены минимальные значения концентрации дефектов, при которых для данного материала будет наблюдаться остаточная намагниченность.

Было рассмотрено температурное поведение кривых намагниченности сверхпроводящих образцов, продемонстрированы отличия в изменении хода кривой под действием температуры в разных образцах.

Приведены усредненные вихревые конфигурации. Показано наличие в сверхпроводнике вихревой треугольной решетки в условиях низких температур. Приведены температуры разрушения решеток для разных образцов. Продемонстрировано температурное поведение бездефектного образца с учетом границы.

Список литературы

1. М.В. Зюбин, И.А. Руднев, В.А. Кашурников. ЖЭТФ 123, вып. 7. 2003г.
2. В.А. Кашурников, И.А. Руднев, и др. ЖЭТФ 117, вып. 1, стр. 196-206 (2000)
3. М.Е. Грачева, В.А. Кашурников, И.А. Руднев, Письма в ЖЭТФ 66 (1997) (1997)
4. В.А. Кашурников, И.А. Руднев, М.В. Зюбин. ЖЭТФ 121, вып. 2, стр 442-452 (2002)

А.С. ЩЕРБАКОВ

Научные руководители – В.И. ПЕТРОВ, к.ф.-м.н., доцент

В.В. ПОПОВ, д.хим.н., с.н.с.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИСЛОРОДНОГО ИНДЕКСА В ВТСП ТИПА $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$

Методом иодометрии определен кислородный коэффициент $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ с достаточной точностью для выявления стабильности критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Кислородная нестехиометрия (x) и соотношение $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ в купратах определяют критическую температуру (T_c) перехода в сверхпроводящее состояние. Так, для $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ [1] сверхпроводящие свойства проявляются при $6,5 < x < 7$ (с двумя плато при $T_c = 60$ К и $T_c = 93$ К), а при $x < 6,5$ сверхпроводящие свойства теряются.

В данной работе в качестве метода определения кислородного коэффициента был выбран метод иодометрического титрования [2] как более предпочтительный перед более сложными. Для исследования был взят образец купрата $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ с неопределенностью в отношении сверхпроводимости и неизвестным кислородным коэффициентом. Соблюдали следующую последовательность экспериментов, позволяющую определить соотношение $\text{Cu}^{3+}/\text{Cu}^{2+}$ по средней степени окисления z . В начале методики градуировали точным титрованием вспомогательного реактива ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). Затем навеску образца купрата, растворенную в подкисленной воде, кипятили; при этом вся медь переходила в Cu^{2+} , это количество определяли титрованием. Другую навеску растворяли в подкисленном растворе KI в закрытой колбе, и в результате титрования находили долю Cu^{3+} в смеси и среднюю степень окисления.

Кислородный коэффициент определяли из соотношения:

$$x = (7/2) + (3/2) \times z$$

Получено значение $z=2.28\pm0.1$, $x=6.92\pm0.03$. Значение кислородного коэффициента соответствует интервалу сверхпроводящих свойств. Относительная погрешность измерений составила 0.43%. Полученное значение кислородного коэффициента достаточно надежно входит в интервал, соответствующий области стабильной критической температуры сверхпроводящего перехода, составляющей около 93 К (рис. 1).

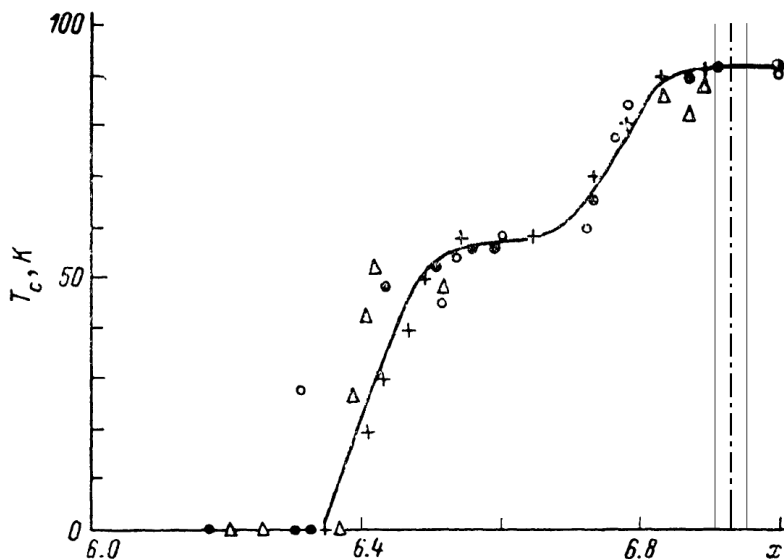


Рис. 1. Зависимость температуры сверхпроводящего перехода T_c от содержания кислорода x . За основу принят график, приведенный в работе [1]. Штрихпунктирной линией показан состав исследуемого образца. Допустимая область ограничена тонкими линиями

Список литературы

1. Н.В. Зайцева, Я.В. Копелевич, И.И. Кочина и др. Зависимость параметров решетки и электропроводности керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ от содержания кислорода. 1991.
2. Jin-Ho Choy, Suk-Yong Choi Song-Ho Byeon, Sung Ho Chun e. a. Determination of the Copper Valency and the Oxygen Deficiency in the High T_c Superconductor, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Seoul National University. 1988.

А.А. СИДОРЕНКО

Научные руководители – СЕВРЮКОВ О.Н., к.т.н., доцент
МОРОХОВ П.В., главный инженер

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА И ПОЛУЧЕНИЕ НЕРАЗЪЁМНЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДИФфуЗИОННОЙ ПАЙКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМОРФНЫХ ПРИПОЕВ

В работе приведены исследования влияния температуры и времени изотермической выдержки, а также толщины шва на прочностные характеристики паяного соединения сплавов титана ВТ6-с и ОТ4, выполненных припоями на основе титана и циркония - СТЕМЕТ 1202 СТЕМЕТ 1410. Для определения прочностных характеристик паяного соединения проведены измерения микротвердости в зоне паяного шва и осуществлены механические испытания на одноосное растяжение. Исследована взаимосвязь структуры паяного соединения с его прочностью.

В НИЯУ МИФИ на кафедре «Физические проблемы материаловедения» в рамках НИРС разработаны и получены высокопрочные паяные соединения сплавов титана ВТ6-с и ОТ4.

Цель данного исследования состоит в разработке режимов пайки и исследовании их влияния на прочностные характеристики соединений титановых сплавов ВТ6-с и ОТ4, полученных методом диффузионной пайки. Основная проблема – осуществить пайку ниже температуры фазового перехода в материале [1], при этом получить высокопрочное соединение, способное работать в экстремальных условиях.

В соответствии с поставленной целью решались задачи по выбору припоев для пайки титановых сплавов ВТ6-с и ОТ4, разработке технологических режимов пайки и получению равнопрочных паяных соединений сплавов титана ВТ6-с и ОТ4.

Известно, что для пайки титановых сплавов применяются припои на основе титана [1], поэтому в качестве припоя выбрали аморфный ленточный припой на титановой основе СТЕМЕТ 1202 [2,3,4,5]. Припой СТЕМЕТ 1410 [2,3,5] с циркониевой основой применяют для пайки циркониевых сплавов [6], но для пайки данных титановых сплавов применяется впервые.

Опираясь на справочные данные и предшествующие исследования [1,7], опробовали пять наиболее подходящих режимов, и по итогам исследований выбрали один оптимальный: изотермическая выдержка при 840°C в течение 2 часов.

Для выявления структурных особенностей паяного шва провели комплекс металлографических исследований, который позволил установить соответствия между структурой паяного шва и его прочностью. Полученные результаты по итогам одноосного растяжения полностью подтвердили предположения о том, что если в паяном шве присутствует эвтектическая часть, то прочность соединения оказывается низкой, и наоборот, если эвтектическая часть отсутствует, то прочность изделия будет на уровне основного материала. Это также подтверждают исследования микротвердости образца: эвтектическая часть имеет большую твердость, а, следовательно, она более хрупкая [4].

Проведенные исследования помогли установить взаимосвязь структуры паяного соединения с его прочностью, что в дальнейшем поможет прогнозировать прочность соединения, лишь посмотрев на его микроструктуру в оптический микроскоп.

В результате исследования установили, что применение припоев СТЕМЕТ 1202 и СТЕМЕТ 1410 толщиной 50 мкм для вакуумной пайки титановых сплавов ВТ6-с и ОТ4 при температуре 840 °С и сборочном зазоре 0,05 мм, позволяет за 2 часа получить соединение, равнопрочное основному материалу.

Список литературы

1. Петрунин И.Е., Березников Ю.И., Бунькина Р.Р., Ильина И.И. и др. Справочник по пайке / Под ред. Петрунина И.Е. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
2. Припой СТЕМЕТ для пайки материалов современной техники. Цветные металлы, №12, 2014, с.32-37
3. Rapidly solidified filler metal foils based on titanium for brazing similar and dissimilar materials Доклад на конференции Proceeding of the 7th Asia Pacific IJW Congress 2013 (IJW 2013), pp.172-174.
4. Влияние структурного состояния припоя на физико-механические свойства паяных соединений. Сварочное производство, 2001, № 8, с. 38-41.
5. Новые аморфные припои для пайки титана и его сплавов. Сварочное производство. 2001. №3. с. 37-39.
6. Разработка ленточных аморфных припоев для пайки циркониевых сплавов. Сб. Докладов V межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 8-12 сентября 1997 г. В 2-х томах. Т.2, Ч.1. Димитровград, 1998 г., с. 226-244.
7. Sharipo A.E., Flom Y. A. Brazing of titanium at temperatures below 800°C // Materials characterization. – 2003. – Vol. 58. – P.38–61.

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ



Я.С. КОЛОБОВА

Научный руководитель – В.Н. РЕШЕТОВ, к.ф.-м.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В НАНОИНДУСТРИИ

В работе поставлены задачи, которые необходимо решать в целях обеспечения единства измерений в наноиндустрии.

Развитие науки и техники связано с развитием системы методов и средств измерений. Внедрение нанотехнологий поставило перед наукой и техникой ряд задач, вызванных малыми размерами элементов.

Область нанотехнологий является приоритетным направлением деятельности различных секторов промышленности: наноэлектроники, нанотехнологии, наноматериалов. Создание и производство всех видов продукции наноиндустрии невозможно без развития системы обеспечения единства измерений.

К продукции, создаваемой в результате применения нанотехнологий, предъявляются особые требования, в частности, к применяемым средствам измерений и их метрологическому обеспечению.

Под метрологическим обеспечением понимается утверждение и применение метрологических норм, правил и методик выполнения измерений, разработка, изготовление и применение технических средств для обеспечения единства и требуемой точности измерений.

Средства измерений, создаваемые и применяемые в наноиндустрии, должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами измерений и повышенной точностью.

Для целей развития системы обеспечения единства измерений в наноиндустрии ставятся следующие задачи:

- совершенствование эталонов;
- создание нового и модернизация существующего оборудования;
- разработка методов и средств измерений параметров нанообъектов;

- разработка методов аттестации стандартных образцов и эталонных мер для калибровки средств измерений;
- разработка и аттестация методик измерений, поверки, калибровки и испытаний средств измерений;
- разработка нормативно-технических документов по обеспечению единства измерений;
- обеспечение измерительных лабораторий, функционирующих в области нанотехнологий, современным высокоточным измерительным оборудованием.

Для эффективной работы системы обеспечения единства измерений необходимо постоянное изучение измерительных задач и анализ измерительных потребностей в сфере нанотехнологий.

Список литературы

1. Программа развития nanoиндустрии в РФ до 2015 года.
2. А.И. Рагулин, Т.М. Козлякова. Развитие российской системы обеспечения единства измерений нанотехнологий. – URL: <http://eq-journal.ru/pdf/01/Raguлин%20АИ.pdf>
3. Наноиндустрия #7/45/2003. В.Окрепилов. Стандартизация и метрология в обеспечении безопасности продукции nanoиндустрии.

РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

Е.А. ДОВГОПОЛАЯ

Научные руководители – В.В. МАСЛЕННИКОВ, д.т.н., профессор

В.В. МЕЩЕРЯКОВ, к.т.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА

На примере сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) рассмотрены возможности применения наиболее распространенных регуляторов с целью уменьшения влияния резонансов механической части на результаты измерений и улучшения его функциональных характеристик. Показана возможность относительно быстрого и простого выбора параметров PID-регулятора на операционном усилителе для обеспечения аperiodического характера переходного процесса в замкнутой системе.

В рамках данной работы исследовались возможности увеличения быстродействия системы автоматического регулирования (САР) СЗМ с улучшением его качественных характеристик при использовании стандартных регуляторов типа I, PI и PID.

При рассмотрении системы управления сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) управляемый процесс содержит такие блоки, как пьезоэлектрический актюатор с подвижным столом, высоковольтный усилитель (драйвер актюатора), емкостной датчик перемещения, зонд и схема возбуждения зонда [1]. Обычно для исследования поведения системы управления СЗМ ограничиваются передаточной функцией петли регулирования не выше третьего порядка [2, 3].

Показано, что в простейшем случае выполнения регулятора в виде интегратора можно использовать давно известное условие [4] отсутствия в характеристическом уравнении комплексно-сопряженных полюсов. Однако, для более сложных регуляторов условие, определяемое известной формулой, практически не позволяет найти соотношение между значени-

ями элементов цепи, которое обеспечивает отсутствие в характеристическом уравнении комплексно-сопряженных полюсов.

На основе приведенных в работе [5] приближенных формул нахождения корней кубических уравнений получены условия отсутствия в характеристическом уравнении комплексно-сопряженных полюсов, что обеспечивает апериодический характер переходных процессов, возникающих при регулировании. Доказано, что использование интегратора, как и регулятора с пропорционально-интегрирующей характеристикой, не позволяет избавиться от комплексно-сопряженных полюсов в замкнутой системе. Получено простое условие для выбора параметров PID-регулятора, которое с некоторым запасом позволяет утверждать, что при его применении возможно добиться апериодического переходного процесса в замкнутой САУ с минимально-фазовым объектом управления.

Список литературы

1. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб ГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
2. Abramovitch, D.Y. Semi-automatic tuning of PID gains for atomic force microscopes/ D.Y.Abramovitch, S.Hoen, R.Workman// American Control Conference. – 2008. – pp. 2684 – 2689.
3. Meshtcheryakov, A.V. Scan speed control for tapping mode SPM/ A.V. Meshtcheryakov, V.V. Meshtcheryakov// Nanoscale Research Letters. – 2012. - 7:121.
4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — Изд. 7-е, стереотипное. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1967. — с. 138 – 139.
5. Масленников В.В. Метод приближенного определения корней кубического уравнения с положительными коэффициентами и комплексно-сопряженными корнями. Вестник НИЯУ МИФИ, 2015, том 4, №2, с. 179 – 183.

Д.В. ПЕТРЕНКО

Научный руководитель – В.В. ДМИТРЕНКО, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРА КОЛОДЕЗНОГО ТИПА НА СЖАТОМ КСЕНОНЕ

Рассмотрены перспективы создания детектора колодезного типа на сжатом ксеноне для решения прикладных задач гамма спектromетрии. Приведены результаты моделирования и проведено сравнение со спектрометром на сжатом ксеноне.

Одним из современных приборов, применяющимся как в научных исследованиях, так и в промышленности, является гамма-спектрометр колодезного типа. Современные детекторы колодезного типа (ДКТ) реализованы, в основном, на базе сцинтилляционных кристаллов или полупроводниковых приборов. Каждый из этих типов приборов обладает принципиальными недостатками: полупроводниковые приборы требуют, как правило, азотного охлаждения и обладают высокой стоимостью, а сцинтилляционные - зачастую, не могут обеспечить должное энергетическое разрешение. Кроме того, на текущий момент нет отечественных производителей данного оборудования.

Путем решения указанных проблем видится разработка гамма детектора колодезного типа на других физических принципах. В частности, предлагается разработать ДКТ на сжатом ксеноне основываясь на опыте разработки уже существующего ксенонового гамма-спектрометра (КГС).

Для расчета возможных характеристик ДКТ на сжатом ксеноне с помощью программного обеспечения Geant4 была разработана модель, показанная на рис.1.



Рис. 1. Модель ДКТ на сжатом ксеноне. Параметры модели:
Плотность газа – 0.3 g/cm^3
Внутренний диаметр – 30 mm
Внешний диаметр – 150 mm
Длина сетки – 102 mm
Диаметр сетки – 60 mm

На основании представленной модели были получены расчетная зависимость эффективности регистрации (см. рис.3) и расчетный спектр ^{137}Cs (662 keV) (см. рис.2) в предположении, что энергетическое разрешение детектора составит 2.5%.

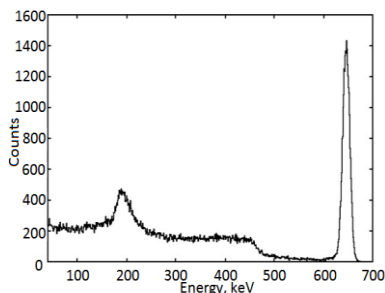


Рис. 2. Расчетный спектр ^{137}Cs (662 keV) для ДКТ на сжатом ксеноне. Энергетическое разрешение 2.5%

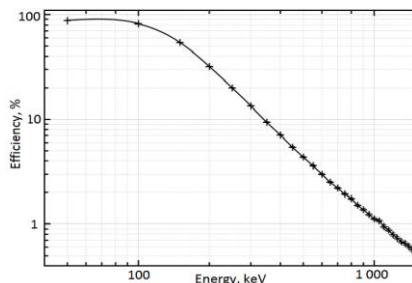


Рис. 3. Расчетная зависимость эффективности от регистрации ДКТ на сжатом ксеноне

Анализ и сравнение полученных данных с результатами, представленными в работах [1,2], показывает, что ДКТ на сжатом ксеноне будет обладать высокой эффективностью регистрации и хорошим энергетическим разрешением. Кроме того, на основании расчетного спектра ^{137}Cs (662 keV) для ДКТ на сжатом ксеноне, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый детектор может упростить идентификацию радиоактивных материалов имеющих гамма-линии в области малых энергий.

Полученные данные позволяют утверждать, что ДКТ на сжатом ксеноне не будет обладать указанными выше недостатками детекторов других типов. Разработка ДКТ на сжатом ксеноне позволит создать надежный, простой в эксплуатации и дешевый детектор отечественного производства с хорошими спектрометрическими характеристиками.

Список литературы

1. Верещенко В. С., Мошкина Н.В., Новиков А.С. Свиридова В.В. Судоплатова И.А. Улин С.Е., Шустов А.Е. Возможность применения ксеноновых гамма-детекторов для измерений в целях учета и контроля ядерных материалов //Науч. сессия МИФИ-2015: Сб. науч. тр.: В 3 т. М.: МИФИ, 2015. Т.1. С.174.
2. Novikov A *et al.* 2014 New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution *Opt. Eng.* 53 (2) 021108

В.А. САЛОМАСОВ

Научные руководители – В.П. ФИЛИППОВ, д.ф.-м.н., профессор

Н.И. ЛАГУНЦОВ, к.ф.-м.н, доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОАО «Аквасервис», Москва

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАЛЕНТНОГО СОСТОЯНИЯ АТОМОВ ЖЕЛЕЗА В РЕАГЕНТЕ ПО ОЧИСТКЕ ВОДЫ МЕТОДОМ МЁССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В МИФИ на кафедрах «Прикладная ядерная физика» и «Молекулярная физика» и при участии ВНИИ Физико-технических измерений при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках соглашения № 14.575.21.0086 был исследован алюмосиликатный реагент по очистке загрязненных вод железосодержащими соединениями в водах артезианских скважин на определение в нем валентного состояния атомов железа.

Проблема очистки загрязненных вод на сегодняшний день является важной проблемой на всех континентах. Для очистки воды используют физико-химические методы, где в качестве реагентов используются различные коагулянты, флокулянты и сорбенты. Знания процессов взаимодействия химических соединений, используемых для водоочистки, с извлекаемыми загрязняющими веществами, в частности, железом, необходимо для создания новых более эффективных реагентов. Эти реагенты должны очистить воду от различных примесей и довести физико-химические показатели до санитарных норм. [1]

Целью настоящей работы является выявление результатов взаимодействия алюмосиликатного коагулянта с железом, содержащемся в воде. Для этого использован метод мёссбауэровской спектроскопии, позволяющий определять валентные и магнитные состояния атомов железа как в кристаллических веществах, так и в аморфных. Исследовано состояние атомов железа в прореагировавшем осадке. Для исследования выбраны модельные воды артезианских скважин Подмосковья. В исследуемую воду ввели реагент, который в процессе взаимодействия с загрязненной водой образовал осадок. Осадок был высушен, и из него приготовлен поглотитель для мёссбауэровских измерений.

Получены мёссбауэровские спектры Fe 57 в режиме пропускания при комнатной температуре (Рис 1.) и при температуре жидкого азота(Рис 2.). Выявлено, что реагент взаимодействует с железом, находящемся в воде, и

выпадает в осадок. Установлено, что в осадке образуется две парамагнитные фазы. В одной фазе, составляющей $(86 \pm 4)\%$, железо находится в трехвалентном состоянии с изомерным сдвигом $IS = 0.34 \pm 0.02$ мм/с с квадратным расщеплением $QS = 0.78 \pm 0.02$ мм/с. Во второй парамагнитной фазе, составляющей $(13 \pm 4)\%$, железо находится в двухвалентном состоянии с изомерным сдвигом $IS = 1.14 \pm 0.02$ мм/с, $QS = 2.38 \pm 0.02$ мм/с.

Измерения при $T = 77^\circ\text{K}$ показали, что на спектрах, полученных при этой температуре, наряду с существованием линий парамагнитных фаз, детектируются линии сверхтонкого магнитного расщепления магнитных фаз. В магнитных фазах железо находится как в двухвалентном, так трехвалентном состояниях. Появление линий сверхтонкого магнитного расщепления магнитных фаз, при $T = 77^\circ\text{K}$, свидетельствует о том, что в выпавшем осадке, железо находится в виде суперпарамагнитных частиц. Проведены расчеты по оценки размеров этих частиц. [2]

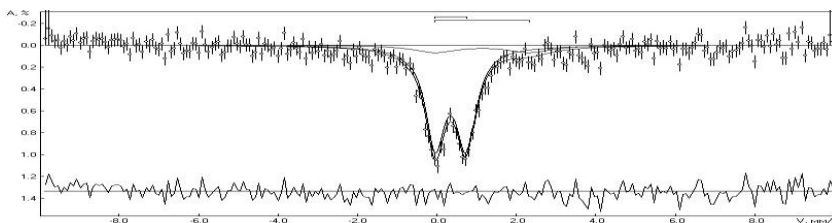


Рис. 1. Мёссбауэровский спектр осадка при $T = 293^\circ\text{K}$

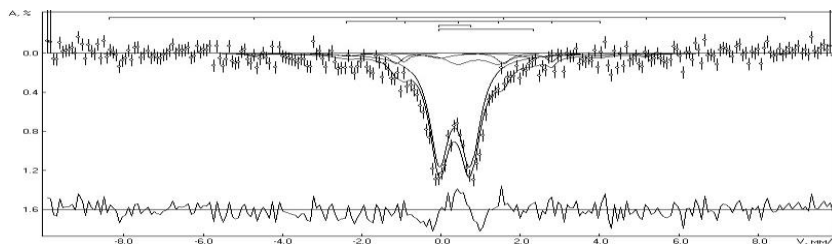


Рис. 2. Мёссбауэровский спектр осадка при $T = 77^\circ\text{K}$

Список литературы

1. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
2. Steen Mørup, Cathrine Frandsen, Mikkel Fougth Hansen. Uniform excitations in magnetic nanoparticles // Beilstein J. Nanotechnol. 2010, 1, 48–54.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.М. ЕГОРОВ, П.Г. НОВИКОВ

Научный руководитель – С.Н. ПОЛЕССКИЙ, к.т.н., доцент

Московский институт электроники и математики,

Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЛЕКТОВ ЗИП

Существующие программные средства проводят оптимизацию по одному параметру, что отвечает современным требованиям. В статье рассмотрены проблемы современных методов оптимизации комплектов ЗИП, а также разработка программного средства позволяющего в автоматизированном режиме рассчитать комплекты ЗИП по двум параметрам.

Запасное имущество и принадлежности (ЗИП) как ресурс обеспечения надежности занимает значительное место в практике проектирования и эксплуатации технических изделий в течение, по крайней мере, последних 50 лет. При использовании ЗИП восстановление работоспособности сводится к замене отказавшего модуля (составной части) на работоспособную запасную часть (ЗЧ), что вполне может быть выполнено эксплуатационным персоналом. В этом случае возникает другая проблема. По соображениям ограничений на суммарную стоимость запасных частей не удается создать такие большие начальные запасы модулей, которые позволяли бы гарантированно иметь ЗЧ при любом отказе в системе. Это значит, что кроме ранее указанной причины отказа резервированной системы (новый отказ до завершения восстановления) появляется и другая причина, а именно отсутствие в комплекте ЗИП необходимой ЗЧ [1].

При оптимизации комплекта ЗИП возникает следующая дилемма: проводить ее по критерию надежности или по критерию достаточности. Поскольку пересчет требований к надежности в требования к достаточности практически не возможен, за исключением случая, указанного в разделе 3, то оптимизация по критерию достаточности может быть проведена только в случае, если нормирование ПД проводится независимо от требований к надежности. Предлагаемые для применения в промышленности сертифицированные программные комплексы проводят оптимизацию по критерию достаточности. Оптимизация должна проводиться по критерию ми-

нимума затрат на создание комплекта ЗИП. Идею отказаться от учета стоимости запасных частей нельзя рассматривать всерьез. От замены показателя надежности на показатель достаточности следует ожидать последствий, аналогичных тем, что были отмечены при формировании комплекта ЗИП [2].

Единственная существующая в настоящее время сертифицированная методика, изложенная в нормативных документах, предназначена для оценки и расчета комплектов ЗИП на основе показателей достаточности. Методика реализована в двух программных комплексах РОКЗЭРСИЗ и АСОНИКА-К-ЗИП. В качестве альтернативы можно рассматривать аналитический метод прямого учета состава комплекта ЗИП в моделях надежности и метод статистического моделирования Монте-Карло. На базе этих методов и методик созданы программные комплексы АСОНИКА-К-РЭС и ИНТЕЛЛЕКТ-ЗИП.

В разрабатываемом математическом аппарате для автоматизированной системы проектирования комплектов ЗИП для программного комплекса АСОНИКА-К-ЗИП реализуется методика оптимизации комплектов ЗИП по двум параметрам, а именно по объему и стоимости. В существующих методах реализованы только оптимизации по одному параметру, что в свою очередь недостаточно эффективно.

Интерфейс программного средства разрабатывается с помощью современной технологии Windows Presentation Foundation (WPF), которая позволяет получить систему с визуально привлекательными возможностями взаимодействия с пользователем, возможностью настраивать внешний вид окон и валидации ввода. Валидация ввода позволит сократить трудоемкость работы за счет снижения допускаемых пользователем ошибок во время работы.

Также ведется разработка web-интерфейса программного средства. Web-интерфейс позволит пользователям получить доступ к полному функционалу программного средства при помощи сети интернет, по защищенному каналу HTTPS. Данный интерфейс имеет ряд преимуществ, так предоставляет пользователю возможность работать удаленно, с компьютера малой мощности и любой операционной системой. Данные между пользователем и сервером будут передаваться по защищенному каналу HTTPS, а формат JSON позволит снизить объем передаваемых данных.

Список литературы

1. Craig C. Sherbrooke "Optimal inventory modeling of systems MultiEchelon Techniques. Second Edition", Kluwer Academic Publishers Group, 2004.
2. Жаднов В. В., Авдеев Д. К., Тихменев А. Н. Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП// Надежность, 2011. №3. с.53.

И.П. ЯКОВЛЕВ, А.В. ЦАРЕНКО

Научный руководитель – С.Н. ПОЛЕССКИЙ, к.т.н., доцент

Московский институт электроники и математики

Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ И ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ЕЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПО СИСТЕМАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И КАЧЕСТВА АППАРАТУРЫ

В статье рассмотрены особенности проектирования базы данных применяемых при разработке систем обеспечения надёжности и качества аппаратуры, а также разработка программного средства (ПС) для отображения всех таблиц и элементов базы данных, создания новой и отдельных её элементов на основе существующей.

В настоящее время требования, предъявляемые к оценке надёжности и качества аппаратуры, являются достаточно жесткими и требуют от специалистов полного и глубокого анализа данного вопроса.

Для усовершенствования работы данной программы разработана база данных со всей необходимой информацией для расчета надежности электрорадиоизделий (ЭРИ), а также ПС, позволяющая повысить качество проектных решений при сокращении сроков оценки надежности.

Спроектированная база данных относится к классу реляционных и состоит из ряда таблиц. Все данные в базе данных представляют собой набор отношений, которые отвечают всем условиям целостности [2]. Каждая таблица имеет свое ключевое поле для связи между ними. Разработанная база данных приведена к третьей нормальной форме. Структура спроектированной базы данных состоит из трех основных таблиц: LST_CLASS_MAIN, LST_GP, LST_INPAR. Первая по значимости таблица – это «LST_CLASS_MAIN». В ней содержатся все классы ЭРИ, которые являются связующим звеном для всех таблиц. Таким образом, от таблицы с классами наследуется таблица LST_GP. В ней хранятся данные о группах классов.

Программное средство спроектировано и реализовано с целью облегчения работы с основными процессами взаимодействия пользователя с базой данных. Интуитивно понятный интерфейс позволяет пользователю в короткие сроки освоить весь функционал для того, чтобы любой пользователь, взаимодействующий с системой, мог без труда работать с её

функционалом. Концептуальная схема для работы с программой представлена на рисунке 1.

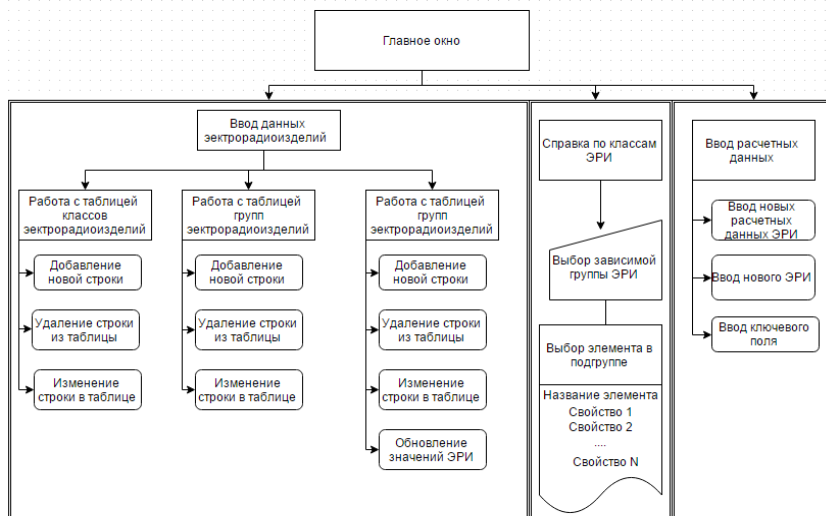


Рис. 1. Блок-схема работы ПК

Программное средство поддерживает подключение к множеству баз данных, ограниченное мощностью вычислительного средства[1]. При изменении структуры базы данных, перед открытием потока, для подключения ПС, выполняется проверка измененной базы данных на соответствие ей третьей нормализованной форме.

При создании базы данных и ПС были учтены все установленные требования. Это обуславливается тем, что ПС и база корректно функционируют и взаимодействуют между собой, а также все встроенные функции выполняются без ошибок. Несмотря на изначально созданную достаточно объемную базу данных, возможность изменения и добавления элементов позволяет развивать как саму базу данных, так и всю систему, для большего распространения её среди пользователей. Также плюсом новой системы является эргономичность. Визуально и функционально грамотно построенный интерфейс позволяет пользователю работать с системой максимально эффективно.

Список литературы

1. J.D. Ullman Principles of database systems // В 2 т. Изд.: Computer Scince Press, 2003.
2. Р.М.Райордан Основы реляционных баз данных// Изд.: Русская редакция, 2001.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

М.А. ЛЕБЕДЕВ

Научные руководители – В.Г. БАРАНОВ, к.т.н., профессор

Д.П. ШОРНИКОВ, к.т.н., с.н.с.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ОКСИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Настоящая работа посвящена созданию установки по определению температуры плавления различных видов оксидного топлива. Разработан эскизный проект установки и изготовлены ее основные узлы. Проведены тестовые испытания и показана возможность достижения температуры 2600 °С.

Для обоснования безопасной и экономичной работы модифицированного оксидного ядерного топлива (МОЯТ) коммерческих реакторов необходимо точное знание температуры плавления диоксида урана. Знание температуры плавления МОЯТ позволяет прогнозировать его поведение в аварийных режимах.

Существующие в настоящее время методы нагрева основаны на использовании резистивного нагрева, лазера, электронного пучка, дуги. Применение указанных методов вносит существенные погрешности в регистрацию температуры, что приводит к значительной ошибке (около 150 °С) при определении линий солидус и ликвидус. Ошибка связана, прежде всего, с трудностями регистрации тепловых эффектов при нагреве (за счет воздействия помех и малости регистрируемых эффектов), а также с возможным изменением состава образца при взаимодействии с газовой атмосферой или материалами оснастки.

В этой связи в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории ОНИЛ-709 разработана установка по определению температуры плавления керамического оксидного ядерного топлива с гарантированным нагревом образца до 2900 °С.

Новизна решения состоит в следующем: за счет герметичной конструкции тигля исключается изменение состава образца в ходе плавки; отверстие в тигле позволяет реализовывать модель абсолютно черного тела, что существенно повышает точность измерения температуры; индукционный нагрев позволяет регулировать изменение температуры с высокой точностью, и при этом возможно достижение температур, близких к температуре плавления тигля (более 2900 °С для вольфрамового тигля). Нагрев тигля производится в водоохлаждаемой кварцевой ампуле, что предотвращает его окисление на воздухе при высоких температурах. Нагрев осуществляется токами высокой частоты, а тепловые эффекты регистрируются высокоточным пирометром.

К существенным достоинствам метода можно отнести простоту реализации.

Для выполнения работы: разработан эскизный проект установки; собран действующий макет установки, способный нагревать образцы до 2600 °С; приобретен высокоточный пирометр, генератор токов высокой частоты; производится изготовление и сборка основных узлов, таких как металлические фланцы для кварцевой водоохлаждаемой трубки, вакуумная система, система охлаждения генератора и трубки, корпус установки в виде сварной рамы; выполняется подготовка герметичных вольфрамовых (танталовых) тиглей, сборка цельной конструкции, разработка методики определения температуры плавления керамического ядерного топлива.

П.С. КОРОЛЕВ

Научный руководитель – И.А. ИВАНОВ, к.т.н.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА РЕСУРС ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ

В работе приведено описание разработанной методики ускоренных испытаний на ресурс электрорадиоэлементов на примере резисторов. Она составлена в соответствии с ГОСТ РВ 20.57.304-98 (Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям к надежности.), ГОСТ РВ 50698-94 (Системы радиоэлектронные бортовые космических аппаратов. Нормы ускоренных ресурсных испытаний), РД 134-0147-2007 (Методики ускоренных ресурсных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. Федеральное космическое агентство), СТП АФЕК.376-2010 (Система менеджмента качества. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на ресурс). С целью экспериментальной проверки показателей долговечности, планируется проведение ускоренных испытаний на ресурс резисторов.

Испытания электрорадиоэлементов на ресурс проводятся в соответствии с техническими условиями (ТУ). Критерием отказа ЭРЭ является выход за пределы хотя бы одного из его параметров.

Испытания ЭРЭ проводятся в 4 этапа:

1-й этап – проверка параметров ЭРЭ в нормальных климатических условиях в термокамере. Нормальными климатическими условиями считаются при температуре окружающей среды от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$, относительной влажностью 45-75 % и атмосферным давлением $8,6 \cdot 10^4 - 10,6 \cdot 10^4$ Па.

ЭРЭ в течение четырех часов размещается в термокамере и периодически проводится включение и отключение питания.

2-й этап – термоциклирование. Проводится три термоцикла ЭРЭ в выключенном состоянии со значением предельных температур: -50°C - $+80^{\circ}\text{C}$. После проведения термоциклирования электрорадиоэлемент выдерживается четыре часа в нормальных климатических условиях. Затем проводится измерение параметров ЭРЭ.

3-й этап – испытания при пониженной температуре. ЭРЭ находится в термокамере при этом включен в рабочую электрическую цепь, т.е. к нему подается напряжение питания. Температура в термокамере -10°C . ЭРЭ в течение четырех часов размещается в термокамере и периодически

проводится включение и отключение питания. Данный этап разбивается на несколько подэтапов, которые проводятся при различных значениях напряжения питания.

4-й этап – испытания при повышенной температуре. ЭРЭ находится в термокамере при этом включен в рабочую электрическую цепь, т.е. к нему подается напряжение питания. Температура в термокамере $+80^{\circ}\text{C}$. ЭРЭ в течение более четырехсот часов размещается в термокамере и периодически проводится включение и отключение питания.

В качестве объекта исследования выбрана выборка из партии резисторов С1-4 резистор 0.5 Вт, 5%, 1 кОм. Размер выборки – 100шт.

Для проведения испытаний изготовлены две отдельные печатных платы, для размещения исследуемых резисторов (рис.1) и токоизмерительных резисторов типа SMD.

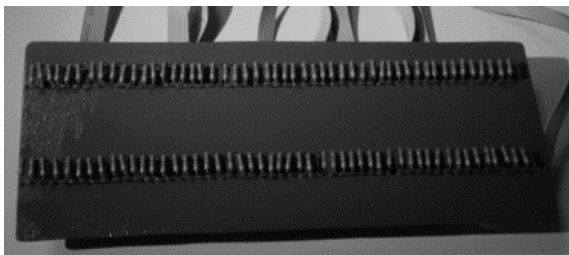


Рисунок 1. Печатный узел с размещенными исследуемыми резисторами

Список литературы

1. ГОСТ РВ 20.57.304-98. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям надежности. – М.: Госстандарт, 1981, 41 с.
2. ГОСТ РВ 50698-94. ГОСТ Р В 50698-94. Системы радиоэлектронные бортовые космических аппаратов. Нормы ускоренных ресурсных испытаний. - М.: Госстандарт России, 1994, 20 с.
3. РД 134-0147-2007. Методики ускоренных ресурсных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов. Федеральное космическое агентство, 2007.
4. СТП АФЕК.376-2010. Система менеджмента качества. Испытания радиоэлектронной аппаратуры на ресурс, 2010.

П.Ю. БОРОВКОВ

Научный руководитель – И.А. БУБЛИКОВА, к.т.н., доцент
Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ Ростовская обл.

АНАЛИЗ НАРУШЕНИЙ В РАБОТЕ АЭС С РЕАКТОРАМИ РБМК-1000

В данной работе представлен анализ информации о нарушениях в работе АЭС России с реакторами РБМК-1000. Показана динамика вклада коренных причин нарушений за период 2007-2013 годов. Выявлена эффективность компенсирующих мероприятий.

В настоящее время Росэнергоатом принял решение о продлении срока эксплуатации реакторов РБМК-1000 до 45 лет. В виду этого была поставлена цель провести анализ закономерностей нарушений эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК-1000 на основе официальной информации, содержащейся в отчетах ВНИИАЭС о расследовании нарушений в эксплуатации АЭС с этим типом реакторов [1].

Для ее достижения мы поставили перед собой ряд задач:

- 1) Оценка значимости отдельных групп нарушений.
- 2) Исследование динамики вклада коренных причин.
- 3) Оценка эффективности компенсирующих воздействий по группам коренных причин.

При анализе данных было выполнено объединение причин по следующим группам:

— нарушения, связанные с недостатками подготовки и неправильными действиями эксплуатационного персонала, назовем «ответственность эксплуатирующей организации»

— нарушения, связанные с недостатками проекта, монтажа, технического обслуживания и ремонта назовем «ответственность подрядной организации».

— нарушения, связанные с недостатками изготовления оборудования назовем «ответственность предприятия-изготовителя».

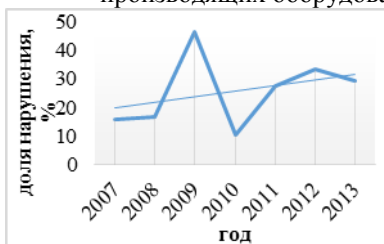
Для определения значимости нарушений проанализируем вклад ответственных за нарушения в их общее количество за период 2007-2013г. Динамики вклада коренных причин нарушений по группам представлена на рис. 1.

Из анализа трендов можно сделать следующие выводы:

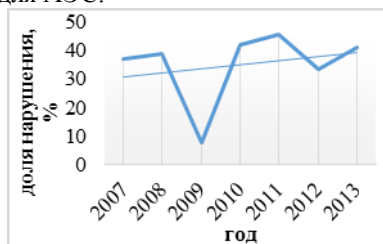
1. Большой разброс данных не позволил получить информационно значимых аппроксимаций динамики, как общего числа наруше-

ний работы энергоблоков с реакторами РБМК-1000, так и их отдельных групп.

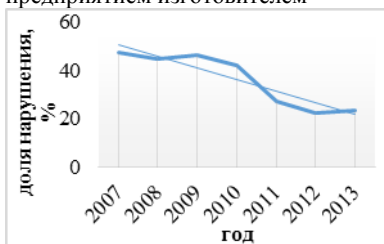
2. Наблюдается тенденция к снижению нарушений, связанных с эксплуатирующей организацией, при этом вклад нарушений, связанных с подрядными организациями и предприятиями-изготовителями, имеет тенденцию к росту.
3. Сложившаяся динамика вклада коренных причин отражает эффективность усилий АЭС по повышению подготовки эксплуатирующего энергоблока персонала, и недостаточную эффективность корректирующих воздействий в предотвращение повторений нарушений в подрядных организациях и на предприятиях, производящих оборудование для АЭС.



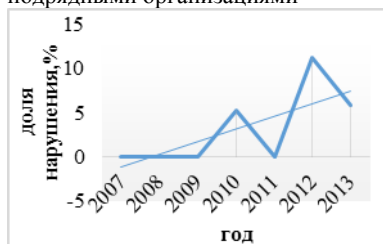
А) Динамика нарушений, связанных с предприятием-изготовителем



Б) Динамика нарушений, связанных с подрядными организациями



В) Динамика нарушений, связанных с эксплуатирующей организацией



Г) Динамика нарушений по неустановленной причине

Рис. 1. Динамика вклада коренных причин в общее число нарушений работы энергоблоков с реакторами РБМК-1000 за период 2007-2013 г.

Список литературы

1. Технический отчет ВНИИАЭС анализ информации о нарушениях в работе АЭС России за 2007-2013.

Е.Д. РИМАШЕВСКАЯ

Научный руководитель – В.А. ЧИЖ, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, Минск

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ И ОТРАБОТАННЫХ ИОНООБМЕННЫХ СМОЛ АЭС

Рассмотрены и проанализированы технологии переработки и дезактивации жидких радиоактивных отходов и отработанных ионообменных смол АЭС. Выделены наиболее экономичные и эффективные методы обращения с радиоактивными отходами АЭС и доказана эффективность их применения

При эксплуатации атомных электростанций (АЭС) образуются большие количества радиоактивных отходов различного уровня активности, поэтому вопросы их переработки занимают важное место в природоохранной деятельности на АЭС.

Традиционными технологиями переработки радиоактивных сточных вод являются дистилляция, ионный обмен, сорбция на активированном угле. Основным недостатком данных технологий является тот факт, что достижение необходимых коэффициентов очистки ($10^5 \dots 10^{10}$) возможно лишь при примерно такой же степени обессоливания растворов. При этом практически все компоненты системы переходят в концентраты, а затем в отвержденные блоки, что приводит к увеличению финансовых затрат на переработку и хранение радиоактивных отходов [1-3].

Возможным решением проблемы переработки радиоактивных сточных вод является использование метода мицеллярно-усиленной ультрафильтрации, суть которого заключается в некоторой химической или физико-химической модификации исходного раствора, в результате чего токсичные компоненты стоков (радионуклиды) переводятся в ассоциированную форму, существующую, как правило, в виде коллоидов. Представленная технология позволяет резко сократить количество радиоактивных концентратов, подлежащих длительному хранению, и повторно использовать очищенную воду и химические реагенты [1].

При использовании традиционной технологии ионного обмена для переработки радиоактивных сточных вод образуются отработанные ионообменные смолы (ОИОС), большая часть которых (60-80%) относится к «низкоактивным» радиоактивным отходам [4]. В настоящее время ОИОС не подвергаются какой-либо переработке и в виде пульпы собираются в

хранилищах жидких радиоактивных отходов. В условиях постоянного увеличения объемов накопленных ОИОС АЭС проблема их переработки имеет значительную актуальность.

Отверждение пульп ОИОС с использованием традиционной технологии прямого цементирования приводит к значительному увеличению объема компаунда, подлежащего захоронению. Использование для отверждения ОИОС полимерных связующих, например, эпоксидных смол (Франция, Бельгия), является достаточно дорогим процессом. Сжигание смол приводит к образованию токсичных и коррозионноактивных продуктов в виде окислов азота и серы, продуктов неполного термического разложения сополимера стирола и дивинилбензола. Частичная термическая деструкция отработанных ионообменных смол по технологии Siemens KWU не приводит к сокращению объема радиоактивно-опасных веществ (РАВ), но требует очистки от продуктов частичной деструкции смолы. Другие известные в настоящее время технологии обращения с ОИОС обладают теми или иными недостатками, что затрудняет их использование в практике АЭС [4].

Наиболее эффективным решением данной проблемы является дезактивация отработанных ионообменных смол АЭС с очисткой от радионуклидов и повторным использованием дезактивирующего раствора [4].

В результате проведенного анализа эффективности применения различных методов переработки жидких радиоактивных отходов и отработанных ионообменных смол АЭС [1-4] выявлены наиболее экономичные и эффективные малоотходные технологии обращения с радиоактивными отходами АЭС, внедрение которых на АЭС позволит повысить экономическую эффективность и экологическую безопасность АЭС.

Список литературы

1. Свитцов А.А., Рябчиков Б.Е., Хубецов С.Б. Технология переработки жидких радиоактивных отходов методом мицеллярно-усиленной ультрафильтрации.// Журнал "Водоочистка", 2010, №1. С.45-48.
2. Скурат В.В. Основные направления деятельности по обращению с радиоактивными отходами в Республике Беларусь.// Научно-практический журнал "Энергетическая стратегия", 2011, №4. С.42-44.
3. Давыдов Ю.П., Торопова В.В.. Переработка жидких радиоактивных отходов, образующихся при эксплуатации АЭС.// Научно-практический журнал "Энергетическая стратегия", 2010, №2. С.21-25.
4. Корчагин Ю.П., Арефьев Е.К. Технология обращения с отработанными ионообменными смолами с использованием глубокой дезактивации с очисткой и многократным использованием дезактивирующих растворов.// Производственно-технический и научно-практический журнал "Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение", 2009, №12. С.22-24.

ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ, КОНСТРУИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА В ЯДЕРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



Я.С. КОЛОБОВА

Научные руководители – М.В. АЛЮШИН¹, доцент

А.А. АФОНАСОВ², ведущий инженер

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

²АО «НИКИЭТ, Москва

ВАРИАНТ СИСТЕМЫ ОБЕГАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В работе рассмотрен вариант системы обегającego контроля, при котором в каждый момент времени контроль производится одновременно по всем датчикам системы, что позволяет мгновенно обнаруживать локальные изменения.

В традиционных системах обегającego контроля одно измерительное устройство поочередно подключается к датчикам каждой из контролируемых величин, результат каждого измерения не содержит информации о состоянии других датчиков и о положении данного датчика относительно остальных в измеряемом пространстве.

Если представить работу системы на примере прямоугольного помещения, содержащего 8 датчиков (по 4 датчика в каждом ряду), то информацию об измеряемом поле в местах расположения датчиков можно получить поочередным измерением в точке расположения каждого датчика (проведя 8 измерений). Если одно из измерений не будет выполнено, то информация о поле в точке расположения данного датчика будет отсутствовать, в этом месте не будет обнаружено наличие искомой аномалии поля.

Неодновременность получения информации по датчикам затрудняет обнаружение небольших аномалий на фоне временных нестационарностей поля. Обнаружение незначительных аномалий на фоне большого фоновго шума отрицательно влияет на точность и затрудняет наблюдение за ростом имеющихся аномалий и обнаружением новых.

Каждое измерение можно рассматривать как наложение двумерной двоичной функции-маски на измеряемое на данном пространстве поле и суммирование результата по всем 8-ми точкам, все «накладываемые» функции должны быть взаимно ортогональны. В случае поочередных измерений каждая функция-маска имеет одно «окошко» только в точке измерения.

В системе обегашего контроля с использованием функций Уолша результатом каждого отдельного измерения является алгебраическая сумма двух равных по численности групп каналов – сигналов одной половины контролируемого пространства, взятых со знаком «плюс», и сигналов другой половины, взятых со знаком «минус».

Формирование групп при каждом измерении осуществляется в соответствии с функциями Уолша, заданными на контролируемом пространстве. Суммы характеризуют преобладание измеряемого поля в одной из частей помещения и не зависят от среднего фона по помещению. Изменение каждой из сумм может быть диагностическим признаком появления аномалии.

Для получения точной информации о каждой точке поля необходимо провести 8 измерений (наложение 8 функций-масок и нахождение 8 сумм). Для обнаружения положения аномалии достаточно нескольких измерений – поле, рассчитанное по неполному количеству измерений, отличается от заданных значений незначительно. Таким образом, для локализации положения аномалии не требуется проведения полного количества измерений.

Данный алгоритм позволяет фильтровать поток данных: обширные аномалии будут влиять на суммы, при подсчете которых помещение делилось на крупные части (половины, четверти), мелкие аномалии влияют только на суммы, при подсчете которых помещение делилось на мелкие части. Таким образом, процесс измерения можно адаптировать с учетом априорной информации и сделать наиболее чувствительным для наблюдения за имеющимися аномалиями. Использование функции Уолша в системе обегашего контроля позволяет:

- регистрировать малые пространственные аномалии измеряемого скалярного поля (влажность, радиационный фон и т.п.) при наличии большого постоянного фона (постоянная составляющая при суммировании компенсируется);
- мгновенно обнаруживать значительные локальные изменения контролируемого поля, т.к. контролируются все датчики одновременно;
- упростить аппаратуру;
- иметь гибкую систему, позволяющую реализовать различные алгоритмы и различные режимы тестирования, вести наблюдение за ростом отдельных выявленных аномалий (течей, радиационных, акустических полей).

М.О. КУРИЛКИН

Научный руководитель – Е.А. ДЕРГУНОВА, к.т.н., доцент
*Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов
им. академика А.А. Бочвара, Москва*

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ Nb_3Sn СВЕРХПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ «ПОРОШОК В ТРУБЕ»

Предложен ряд научно исследовательских работ, направленных на доработку ранее разработанной в АО «ВНИИНМ» технологии изготовления Nb_3Sn сверхпроводников методом «порошок в трубе», с целью запуска полупромышленного выпуска технических сверхпроводников в АО ВНИИНМ, а также выпуска готовой партии сверхпроводников по данной технологии с заданными свойствами.

В АО ВНИИНМ успешно ведется разработка технологии изготовления многоволоконных Nb_3Sn сверхпроводников по методу «порошок в трубе» с высокой токонесущей способностью. При поддержке АО ТВЭЛ успешно выполнена НИР на данную тему, получены первые образцы сверхпроводников с использованием данного метода [1].

Целью проекта является практическое освоение разработанной технологии и выпуск полупромышленной партии готового технического сверхпроводника с высокой токонесущей способностью, в котором будут заинтересованы многие предприятия в России и за ее пределами.

В данном проекте для запуска полупромышленного выпуска сверхпроводников в АО ВНИИНМ предложен ряд НИР, направленных на отработку разработанной технологии:

- оптимизация технологии получения порошка;
- отработка технологии получения биметаллических труб Cu-Nb;
- оптимизация конструкции многоволоконной сборки;
- отработка технологических схем полупромышленного выпуска крупной партии сверхпроводников;
- разработка оптимального режима диффузионного отжига.

В рамках данного проекта предполагается выпустить полупромышленную партию технического сверхпроводника объемом до 100 кг с токонесущей способностью до 2000 А/мм² (12 Тл, 4,2 К).

Список литературы

3. Курилкин М. О., Зубок Е. А., Абдюханов И. М., Дергунова Е. А., Сафронов Б. В., Чуканов А. П. Разработка режимов изготовления экспериментальных многоволоконных Nb_3Sn сверхпроводников по методу «порошок в трубе» // МАИК «Наука/Интерпериодика»: Вестник МИФИ, 2015, Т.3(4). С.206-213.

И.В. АЛЯЕВ

Научный руководитель – Н.А. СЕЛЯЕВ, ведущий инженер
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МАКЕТ ИМИТАТОРА СИГНАЛОВ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ

Рассматриваются результаты проектирования макета имитатора сигналов ионизационных камер деления, предназначенного для проверки математических алгоритмов формирования сигналов ионизационных камер деления.

Ионизационные камеры деления (ИКД) предназначены для регистрации нейтронов. Совместно с аппаратурой контроля нейтронного потока (АКНП) ИКД используются для измерений плотности потока нейтронов в ядерных установках [1]. Необходимыми этапами жизненного цикла АКНП является её проверка, калибровка и настройка, для чего должно применяться устройство, имитирующее сигнал ионизационной камеры. В настоящее время существует ряд изделий, предназначенных для калибровки АКНП, однако ни одно из них не позволяет проверять все режимы работы широкодиапазонной аппаратуры контроля нейтронного потока (импульсный, флуктуационный и токовый).

Целью работы являлось создание макета имитатора сигналов ионизационных камер деления, работающего во всем диапазоне изменения сигнала ИКД, на основе оборудования PXI фирмы National Instruments. Макет предназначается для проверки алгоритмов формирования сигналов ИКД.

Создание программного обеспечения для решения поставленной задачи осуществлялось в среде программирования NI LabVIEW.

Сигнал ИКД представляет собой последовательность импульсов тока со случайным временем возникновения (зависящим от плотности потока нейтронов) и случайными зарядами в импульсах (зависящим от амплитудного распределения) [2].

Для расчёта модели сигнала ионизационной камеры пользователь задаёт следующие параметры: функция изменения плотности потока нейтронов во времени, спектр распределения зарядов, вызванных регистрацией нейтронов, форма и длительность импульсов ИКД, время воспроизведения сигнала и шумовая составляющая сигнала, характеризующая гамма фон.

В связи с необходимостью формировать различные функции изменения плотности потока нейтронов, которые могут быть описаны как аналитическими функциями времени (статический сигнал, линейное или экспоненциальное изменение) так и математическими моделями реакторов (при формировании сигналов реактивности) задача распределения импульсов ИКД во времени решается на ЭВМ. Все время воспроизведения делится на равные интервалы, в каждый из которых попадает случайное число импульсов. Интервалы выбираются достаточно малыми (порядка 10^{-8} с), для обеспечения возможности максимально точного моделирования динамических процессов. В соответствии с функцией изменения плотности потока нейтронов во времени рассчитывается файл со случайным количеством импульсов на каждом интервале разбиения времени воспроизведения сигнала. После чего этот файл, а также описание спектра и формы импульса, передаётся в FPGA модуль. В FPGA производится расчёт модели сигнала ИКД в реальном времени. При этом динамический диапазон выходного импульсного сигнала снижается за счет учета среднего значения тока, которое восстанавливается при помощи ЦАП, обеспечивающего воспроизведение сигнала постоянного тока.

Макет имитатора позволяет воспроизводить модели как статических, так и динамических сигналов во всем диапазоне работы ИКД (от импульсного при загрузке от 1 с^{-1} до флуктуационного при загрузке до 10^9 с^{-1} и токового до 1 мА).

Работа макета имитатора проверялась путем моделирования сигналов различных типов ИКД и с использованием разных АКНП.

Разработанный макет имитатора сигналов позволил подтвердить правильность работы алгоритмов формирования сигналов ИКД. Макет может быть использован для проверки АКНП. Следующим этапом работы планируется разработка методик метрологической аттестации имитатора сигналов ионизационных камер деления.

Список литературы

1. Системы контроля нейтронного потока для управления и защиты ядерных реакторов. ГОСТ 27445-87.
2. Росси Б., Штауб Г., Ионизационные камеры и счетчики. – Москва: Издательство иностранной литературы, 1951 – 241 с.

В.О. КОСТИКОВ

Научный руководитель – Ю.Н. ВОЛКОВ, к.т.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МАЛЫЕ МОДУЛЬНЫЕ РЕАКТОРЫ: ВЗГЛЯД НА БУДУЩЕЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Рассматриваются особенности строения и эксплуатации малых модульных реакторов. Приведены различия конструкций реакторов разных проектов, а также принципиальные отличия реакторов малой мощности от промышленных реакторов большой мощности.

Увеличение уровня потребления электроэнергии ставит перед энергетиками всего мира задачу: обеспечить большое количество людей электроэнергией в короткий срок. Эту проблему может решить ядерная энергетика и, в частности, модульные реакторы малой и средней мощностей.

В работе рассмотрены особенности создания и промышленного применения малых модульных реакторов. Показаны различные типы конструкций реакторных блоков. Большое внимание уделено преимуществам малых модульных реакторов.

Использование различных видов топлива: МОХ-топлива, низкообогащённого уранового (НОУ) топлива-предполагает большие возможности повышения эффективности ядерной энергетической установки, соответствия международным стандартам нераспространения ядерных материалов, а также увеличения срока эксплуатации без перезагрузки топлива.

Широкое применение пассивных принципов обеспечения безопасности (интеграция парогенераторов внутри корпуса реактора, применение принципов естественной циркуляции) выгодно отличает малые модульные реакторы от реакторов и реакторных блоков средней и большой мощностей. Кроме этого, в работе рассмотрены недостатки, а так же принципиальные проблемы создания и ведения в широкое пользование малых модульных реакторов.

Проблема энергообеспечения различных, в том числе и труднодоступных, районов актуальна не только в России, но и во всём мире. Её решение можно найти в поставке некоторого числа мобильных, долговечных источников энергии в данные области.

Железнодорожный транспорт является одним из наиболее удобных и дешёвых способов доставки тяжёловесных грузов по всему миру, включая регионы, неподключенные к центральным электросетям.

В работе был произведён расчёт прочности герметичного корпуса малого модульного реактора, пригодного к транспортировке железнодорожным составом, при этом учитывались следующие принципы:

- 1) Корпус должен быть достаточно лёгким и иметь малые габариты для его транспортировки неспециальным железнодорожным транспортом;
- 2) Корпус должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать последствия любой аварии и остаться целым, тем самым исключить возможные риски и обеспечить максимальную степень безопасности.

Расчёт показал, что создать корпус реактора, удовлетворяющий данным условиям возможно.

Список литературы

1. Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology by Marcin Karol Rowinski, Timothy John White, JiyunZhao, Renewable and Sustainable Energy Reviews 44(2015) 643–656
2. Аналитический обзор по малым модульным реакторам, по заказу журнала «Атомный эксперт», апрель 2013 года
3. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность, ИПК издательство стандартов, Москва
4. Маршалл, В. Основные опасности химических производств [Текст] / В. Маршалл ; пер. с англ. - Москва : Мир, 1989. - 671 с.

О.Н. КОВАЛЕВА

Научный руководитель – Ю.И. ПИМШИН, д.т.н., профессор
Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ, Ростовская обл.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК (ЗГО)

Защитная оболочка является восьмым контуром защиты АЭС. При возведении ЗГО монтируется система непрерывного мониторинга. Однако при вводе в эксплуатацию вводятся не 100 %. По различным причинам выходят из строя часть датчиков. При эксплуатации в течение 5 лет перестают работать 7% датчиков, а оболочки строятся на 30-50 лет. В соответствии с этим необходима разработка альтернативной мобильной диагностики защитной оболочки АЭС. Нами представляется система, основанная на измерении перемещений.

Основным критерием оценки технического состояния ЗГО, исходя из требований СП-52-102-2004, и определения её ресурсных характеристик является коэффициент запаса прочности, который определяется

$$K = \frac{\sigma_{пред}}{\sigma_{доп}} \quad (1)$$

где $\sigma_{пред}$ – предельное напряжение; $\sigma_{доп}$ – допустимое напряжение;
Известно, что для одноосного сжатия

$$\sigma_{пред} = E \cdot \frac{\Delta_{пред}}{l_0}, \quad (2)$$

$$\sigma_{доп} = E \cdot \frac{\Delta_{доп}}{l_0}. \quad (3)$$

Тогда подставив (2) и (3) в (1) получим

$$K_0 = \frac{\Delta_{пред}}{\Delta_{доп}}. \quad (4)$$

Применительно к ЗГО в качестве $\Delta_{пред}$ принимают перемещения контролируемых точек, размещенных на элементах (стенках) ЗГО при ее преднапряжении. В качестве $\Delta_{доп}$ – принимают перемещения тех же точек на этапе испытаний при наборе внутреннего давления равного 4.6 атм.

Согласно требований СП-52-102-2004 к предварительно напряженным железобетонным конструкциям $K_0 \geq 1.5$ на всех этапах эксплуатации начиная с преднапряжения. При этом после испытаний, определенный по результатам коэффициент K_0 принимается начальным. Далее ежегодно

определяются величины годовых перемещений δ_i . И текущий коэффициент на любом этапе ЗГО определяется

$$K_i = \frac{\Delta_{nped} + \sum_{i=1}^n \delta_i}{\Delta_{исп}}. \quad (5)$$

Здесь $f_{deg} = \Delta_{nped} + \sum_{i=1}^m \delta_i$ является функцией деградации ЗГО. При этом

$$d_i = \frac{K_i}{K_0}, \quad (6)$$

d_i – параметр, определяет текущий ресурс ЗГО.

Если $d_i > 1$ то ЗГО находится в допустимом режиме эксплуатации. Если же $d_i < 1$ то защитная оболочка находится в ограниченном режиме эксплуатации и требуется разработка мероприятий для повышения эксплуатационной надежности ЗГО.

Список литературы

1. СП 52-102-2004 Предварительно напряжённые железобетонные конструкции
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов, 1976г.

Л.Ю. ГУСЕВА, М.С. СТАЛЬЦОВ, И.А. БОГАЧЕВ
Научный руководитель – И.И. ЧЕРНОВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕЛИЕВОЙ ПОРИСТОСТИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЯР

Методом просвечивающей электронной микроскопии изучены особенности формирования гелиевой пористости в приповерхностном слое ферритно-мартенситных сталей и ванадия, облученных ионами He^+ и ионами Ni^{2+} до дозы 100 сна при 923 К. Обнаружено, что при облучении He^+ крупные газовые пузырьки формируются в зоне максимальной концентрации радиационных вакансий. Кроме того, в некоторых зернах образуются мелкие пузырьки на глубинах, превышающих пробег ионов He^+ в облучаемом материале.

Перспективными материалами для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах, а также первой стенки термоядерных реакторов (ТЯР) будущего, являются дисперсно-упрочняемые оксидами (ДУО) стали на различной основе (ферритные, ферритно-мартенситные, мартенситные), а также сплавы на основе ванадия. Реакторное облучение приводит к образованию в конструкционном материале гелия и водорода, их накоплению и развитию газовой пористости, что оказывает существенное влияние на радиационную повреждаемость материала. Целью работы явилось выявление особенностей формирования гелиевой пористости в приповерхностном слое материалов при облучении ионами He^+ и Ni^{2+} . В работе исследованы ферритно-мартенситные стали ЭП-450, ЭП-450-ДУО (0,5 мас. % Y_2O_3), а также модельные α -Fe (армко) и V (99,98%).

При высокотемпературном внедрении гелия в облученных материалах сформировались гелиевые пузырьки. Как видно из рис. 1 а, б, в однофазных железе и ванадии при облучении сформировались крупные пузырьки, достаточно равномерно распределенные по объему. В стали ЭП-450 (рис. 1, в) пузырьки распределены крайне неравномерно как по объему образца, так и по размерам в теле зерна. Наряду с крупными пузырьками в феррите (зерна 1 и 2) наблюдаются зоны с пузырьками меньшего размера очень низкой плотности (зерно 3). В ДУО стали также наблюдается неравномерное распределенные пузырьков (рис. 1, г): есть участки с мелкими и крупными пузырьками, а также свободные от них зоны. При последова-

тельном облучении ионами He^+ с энергией 40 кэВ и Ni^{2+} с энергией 7,5 МэВ существенно изменяется приповерхностная микроструктура образцов (рис. 2).

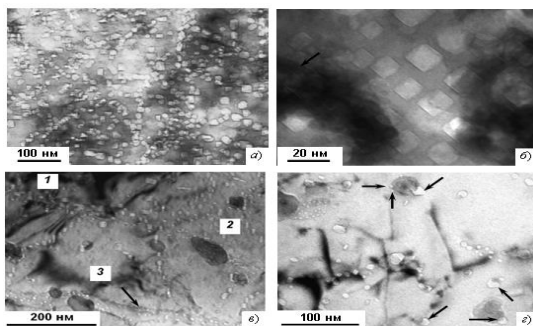


Рис.1. Микроструктура α -Fe (а), V (б), сталей ЭП-450 (в) и ЭП-450-ДУО (г), облученных ионами He^+

Из пузырьков, образовавшихся при облучении ионами He^+ , в процессе облучения ионами Ni^{2+} в течение около 20 ч формировались полости и гелиевые пузырьки обнаруживаются на значительных глубинах мишени, вызывая газовое распухание (рис. 2, б).

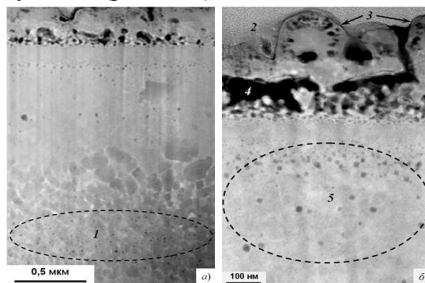


Рис.2. Общий вид V, облученного последовательно ионами He^+ и Ni^{2+} вдоль пробега ионов (а) и область, прилегающая к облучаемой поверхности (б)

По-видимому, гелий проникает в глубокие слои материала за счет отдачи и/или ионного перемешивания. Этот фактор обнаружен впервые, и его следует учитывать при оценке ресурса конструктивных элементов первой стенки ТЯР, обращенных к плазме. Без предварительного внедрения гелия в образцах обнаружены только вакансионные поры, подобные показанным на рис. 2а, вызванные облучением ионами никеля.

ТЕХНОЛОГИИ ЗАМЫКАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

И.С. САЛЬДИКОВ

Научный руководитель – Г.В. ТИХОМИРОВ, д.ф.-м.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЦИКЛА ТОПЛИВА В ЗАМКНУТОМ ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ НА МОДЕЛИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БН-1200

На модели активной зоны реактора БН-1200 смоделировано поведение топлива в режиме рецикла в замкнутом ядерном топливном цикле. Рассмотрены различные топливные композиции исходной загрузки и влияние этих параметров начальной загрузки и неопределенностей на конечный результат.

В рамках проекта «Прорыв», связанного с замыканием ядерного топливного цикла в Российской Федерации, стоит задача по использованию выгруженного топлива из реакторов БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 повторно в этих реакторных установках – т.н. режим рецикла. Т.е. выгруженное топливо после выдержки и переработки можно снова использовать в реакторе, что решает вопрос нехватки мировых запасов ядерного топлива на многие сотни лет вперед.

В рамках независимого тестирования кодов[1] проекта «Прорыв» был разработан модуль рецикла, моделирующий поведение топлива в быстрых реакторах, его массу, нейтронно-физические характеристики, в течение кампании, равной 60 лет. Данный модуль позволил смоделировать режим рецикла в реакторных установках, собранных в программе JARFR.

Были исследованы различные режимы рецикла: время выдержки во внутриреакторном хранилище, типы топливных композиций, различные значения обогащения топлива реактора БН-1200. Изучен вопрос выхода на равновесную концентрацию плутония в реакторе БН-1200.

Созданный комплекс может быть использован для обоснования времени выхода на равновесную концентрацию и для моделирования процессов замкнутого ядерного топливного цикла с учетом неопределенностей, входящих в нейтронно-физические величины.

Список литературы

1. Белов С.Б., Киселёв А.В., Марова Е.В., Фаракин М.Р. и др. Результаты верификации программ расчёта нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора типа БН-1200 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2014. № 4. С. 66-76.

А.Д. СМЕРНОВ

Научный руководитель – Г.В. ТИХОМИРОВ, д.ф.-м.н., доцент
Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

РАЗРАБОТКА ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ КОДОВ НА ВОЗМОЖНОСТЬ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА РЕЦИКЛА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ БН-1200

На примере модели активной зоны реактора БН-1200 сформулирована тестовая задача на проверку нейтронно-физических кодов для расчета основных параметров замкнутого топливного цикла.

Курс на быстрые реакторы, позволяющие осуществить замкнутый топливный цикл, озвучен в долгосрочной стратегии развития атомной отрасли в первой половине XXI в. [1]. Необходимость замыкания ЯТЦ неоднократно подтверждалась результатами многочисленных исследований [2].

Расчет реакторов на быстрых нейтронах обладает рядом особенностей, которые следует учитывать при разработке кодов, использующихся при расчете реакторов этого типа [3]. Поэтому программа, которую на протяжении нескольких лет эксплуатировали для расчета тепловых реакторов, может некорректно работать для задач в быстром спектре нейтронов.

В рамках проекта “ПРОРЫВ” перед авторами данного доклада была поставлена задача кросс-верификации нейтронно-физических кодов. Для выполнения верификации кодов на возможность расчета режима рецикла топлива сформулирована тестовая задача, которую предлагается распространить среди пользователей программ с целью сбора и анализа результатов. Целями этой задачи является исследование различных режимов рецикла: время выдержки во внутриреакторном хранилище, типы исходных топливных композиций, различные значения обогащения топлива реактора БН-1200. Так же с помощью результатов удастся изучить вопрос выхода на равновесную концентрацию плутония: время выхода и полученный вектор плутония.

В качестве модельной задачи были рассмотрены различные геометрии: от ТВС, в которой гомогенно размешаны теплоноситель, топливо и конструкционные материалы, до полноразмерной модели активной зоны БН-1200. В итоге основной моделью была выбрана модель АЗ реактора с

некоторыми упрощениями: уменьшено количество типов ТВС и принята разбивка ТВС по высоте на пять слоев.

При разработке сценария облучения авторы основывались на известные материалы по БН-1200. Кампания реактора составляет 63 года, длительность нахождения ТВС в активной зоне до переработки – 6 лет, выдержка топлива после АЗ во внутриреакторном хранилище – 1080 суток с дальнейшей переработкой и повторным размещением в АЗ (рис. 1).

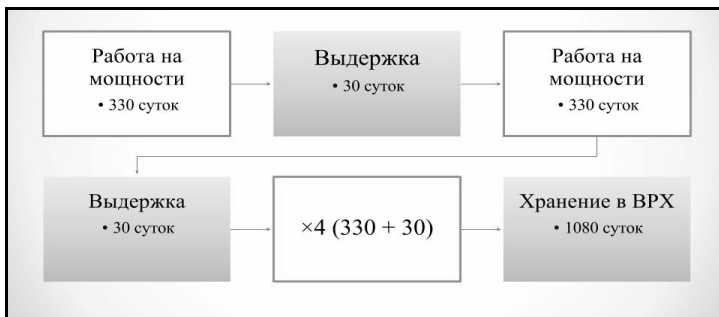


Рис. 1. История облучения топлива

В качестве рассчитываемых функционалов предлагаются различные характеристики. Основное влияние исследований всегда направлено на расчет эффективного коэффициента размножения, однако расчет остальных функционалов может стать проблемным местом, поэтому они так же представлены в задаче. Среди них имеются: эффект Доплера на топливе, натриевый пустотный эффект, параметры воспроизводства топлива.

Ввиду того, что база расчетных задач по быстрым реакторам существенно меньше аналогичной по тепловым нейтронам, данная задача на расчет характеристик режима рецикла несомненно найдет применение при верификации специализированных кодов.

Список литературы

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. М., Минатом России, 2000.
2. Муравьев Е.В. Актуальность замыкания ядерного топливного цикла. - Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 6, с. 334-342.
3. Зизин М.Н. Методы расчета нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов. М., НИЦ "Курчатовский институт", 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



Е.А. ДОВГОПОЛАЯ

Научный руководитель – В.В. МАСЛЕННИКОВ, д.т.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОБОБЩЕНИЕ АЛГОРИТМА УСКОРЕННОГО ПРИБЛИЖЕННОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ КОРНЕЙ КУБИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ С КОЭФФИЦИЕНТАМИ ЛЮБОГО ЗНАКА

В работе приведены результаты доработки начальных оценочных приближенных формул для отыскания корней кубических уравнений с коэффициентами любого знака до полноценного численного метода решения данной гладкой нелинейной задачи с необходимой погрешностью 0,5%.

Изучение многих технических систем и физических объектов приводит к необходимости решения уравнений третьей степени. Известно, что определение корней кубических уравнений по формулам Кардано [1] приводит к сложным выражениям, анализ которых

с целью оптимизации характеристик систем практически невозможен. В современной практике для этих целей широко используется численное моделирование. Более того, усиливается интерес к развитию различных способов упрощения известных методов с целью их реализации на вычислительных средствах малой мощности, используемых, например, в различных встраиваемых системах управления.

В связи с этим в программе [2] был реализован новый подход к оценке значений корней кубического уравнения, удовлетворяющего условиям устойчивости с последующим уточнением полученных решений. Тем не менее, для развития этого подхода до полноценного численного метода решения определенной выше гладкой нелинейной задачи необходимо его распространение на все действительное поле значений коэффициентов кубического уравнения.

Первым шагом в этом направлении было обобщение приближенных формул вычисления корней кубического уравнения с положительными коэффициентами на случай, когда его решения расположены в произвольной области поля комплексных значений.

Результаты этой работы отражены в [3]. Введением новых поправочных коэффициентов, а также изменением параметров итерационных вычислений, удалось добиться существенного повышения точности.

Авторская замена переменных позволила обобщить предлагаемый метод на случай любых коэффициентов кубического уравнения.

Итогом разработки стало программное приложение [4], которое позволяет существенно сократить затраты машинных ресурсов при расчетах. Хотя работа и проводилась в рамках исследования систем автоматического регулирования, полученные результаты могут найти широкое применение и в других областях, связанных с решениями гладких нелинейных задач, интегро-дифференциальных уравнений (при комбинировании с преобразованиями Лапласа) и проблемы собственных значений.

Список литературы

1. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — Изд. 7-е, стереотипное. — М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1967. — с. 138 – 139.
2. Масленников В.В. Новый метод решения алгебраических уравнений без использования мнимых чисел / Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», т. 6 – 2015.
3. Масленников В.В., Довгополая Е.А. Программное приложение, реализующее алгоритм ускоренного приближенного вычисления корней кубического уравнения с положительными вещественными коэффициентами с комплексно-сопряженными корнями. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610873. Дата регистрации 20 января 2015 года.
4. Масленников В.В., Довгополая Е.А. Программное приложение для ускоренного численного решения кубических уравнений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615903. Дата регистрации 27 мая 2015 года.

О.Ю. МАЯКОВА, А.В. АЛЕЙНИКОВ, С.Н. ПОЛЕССКИЙ

Научный руководитель – А.В. ВОСТРИКОВ, к.т.н.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЖГУТОВ

Коллективом авторов был проведен анализ математических моделей оценки интенсивности отказов элементов радиочастотных жгутов и выведена результирующая модель, объединяющая модели входящих компонентов. Результаты представлены в наглядной форме, позволяющей легко убедиться в обоснованности сделанных выводов.

По итогам разработок часть электронной компонентной базы (ЭКБ) бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) космических аппаратов (КА) представляют элементы радиочастотных (РЧ) жгутов (около 30%).

Практика проведения оценки показателей надежности БРЭА показывает, что входящие в состав РЧ жгутов элементы вносят ощутимый вклад в надежность аппаратуры. Но статистика, получаемая по результатам эксплуатации БРЭА, свидетельствует о высокой надежности РЧ жгутов. Таким образом, рассчитанные на этапе проектирования значения показателей надежности оказываются заниженными и возникает необходимость исследования вопроса расхождения теоретических расчетов и практических результатов.

Для проведения сравнительного анализа была построена структурная схема надежности (ССН) РЧ жгута. На рисунке 1 приведено последовательное с точки зрения надежности соединение двух РЧ соединителей (СР), двух паяных соединений (С) и одного РЧ кабеля (РК).

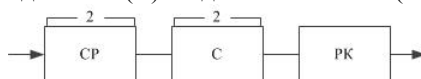


Рис. 1. Структурная схема надежности РЧ жгута

Принимая, что время до отказа элементов ССН распределено по экспоненциальному закону и все элементы ССН соединены последовательно, то согласно инженерному справочнику [8] результирующая интенсивность отказов РЧ жгута может быть представлена в виде суммы интенсивностей отказов входящих в его состав элементов:

$$\lambda_{\text{ж}} = 2 \cdot \lambda_{\text{ND}} + 2 \cdot \lambda_{\text{C}} + \lambda_{\text{DE}}, \quad (1)$$

где λ_{CP} – интенсивность отказов CP, λ_C – интенсивность отказов C, λ_{PK} – интенсивность отказов PK.

В различных справочниках и стандартах математические модели для расчета эксплуатационной интенсивности отказов номенклатуры ЭКБ, входящей в состав РЧ жгутов, дают абсолютно разные результаты с большим разбросом значений. Путем уточнения модели (1) с помощью данных справочников [2, 3, 4, 5, 6] были построены модели оценки интенсивности отказов РЧ жгута. Полученные модели для каждого справочника были апробированы, а разброс значений интенсивности отказов составил от $8,73 \cdot 10^{-11}$ до $2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/ч. Такой разброс вызван количеством учитываемых факторов. Также на основе справочника [2] была построена комбинированная модель оценки интенсивности отказов РЧ жгута, позволяющая устранить основной недостаток исходной модели.

По итогам сравнительного анализа моделей количественной оценки интенсивность отказов РЧ жгута были получены результаты (см. таблицу 2), позволяющие сделать следующие выводы:

Современные проблемы надежности. Анализ надежности оборудования АЭС в справочниках MILHDBK 217f, MILHDBK217PLUS-06 и Standard-Chinese 299B отсутствуют модели расчета интенсивности отказов РЧ кабелей, так как авторы этих изданий принимают их безотказными, то есть интенсивность отказов РЧ кабелей приравнивается к 0;

- в справочнике MILHDBK217PLUS-06 также отсутствует модель расчета интенсивности отказов соединений (интенсивности отказов была принята равной 0, по аналогии с РЧ кабелем);

- наиболее полная модель оценки интенсивности отказов РЧ жгута приведена в справочнике «Надежность ЭРИ», но ее необходимо дополнить коэффициентом, зависящем от качества приемки (таким образом, часть модели, описывающая оценку интенсивности отказов соединений, была заимствована из справочника Standard-Chinese 299B).

Список литературы

1. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности, 2005
2. Справочник «Надежность ЭРИ» 2006
3. Military Handbook MIL-HDBK-217f
4. Military Handbook MIL-HDBK-217f NOTICE 2
5. RIAC-HDBK-217Plus (Handbook of 217PlusTM Reliability Prediction Models). Reliability Information Analysis Center, 2006
6. Standard Chinese 299B
7. www.reliabilityeducation.com/intro_mil217.html
8. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ // М.: Изд-во «Наука». – 1965. – 526 с. – 2015.

А.М. АНТОНОВА

Научные руководители – А.В. УЛАНОВА, к.ф.-м.н., доцент

П.К. СКОРОБОГАТОВ, д.т.н., профессор

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО p-n-ПЕРЕХОДА В COMSOL MULTIPHYSICS МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На примере модели типичного p-n-перехода в составе кремниевой КМОП-микросхемы моделировалась реакция на воздействие одиночного импульса напряжения (ОИН) при различных геометрических размерах p-n-перехода.

С уменьшением проектных норм современных технологий увеличивается чувствительность элементов интегральных схем (ИС) к внешним дестабилизирующим факторам, включая воздействие ОИН по выводам. Использование стандартных программ электрического моделирования (типа SPICE) невозможно, так как амплитуда ОИН существенно превышает рабочие уровни и выходит далеко за пределы адекватности электрических моделей. Необходимо использовать модели физического уровня, основанные на решении фундаментальных уравнений переноса носителей в объеме полупроводника.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics (CM) позволяет проводить моделирование фундаментальных процессов переноса носителей с учетом термоэлектрических эффектов.

Возможности программного пакета CM исследовались на примере моделирования воздействия ОИН большой амплитуды на p-n переходы различных размеров. Применение двумерного моделирования позволило учесть реальную геометрию моделируемой структуры и граничные условия на контактах и поверхности полупроводника. Решалась система уравнений уравнения диффузии для n- и p-областей, уравнение Пуассона и уравнение теплопроводности в узлах треугольной сетки.

Используются два источника импульсного напряжения V1 и V2, ширина импульса источника V1 составляет 10 нс, источника V2 – 100 нс. Напряжение подается через резистор с сопротивлением 50 кОм. Расчеты проводятся при подключенном только источнике V1 или источнике V2. При таком подходе в качестве уровня воздействия принимается значение амплитуды сигнала напряжения $U_m = 50$ В генератора ОИН с внутренним сопротивлением 50 Ом, обеспечивающим двухэкспоненциальную форму

сигнала $U(t) = U_m \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right]$, где $U(t)$, $U_{\max}$ – соответственно текущее и максимальное значения напряжения генератора; τ_1 , τ_2 – постоянные времени спада и нарастания ОИН. В ходе моделирования были сняты зависимости напряжения токов на диоде при включении только источника V1 и только при включении источника V2.

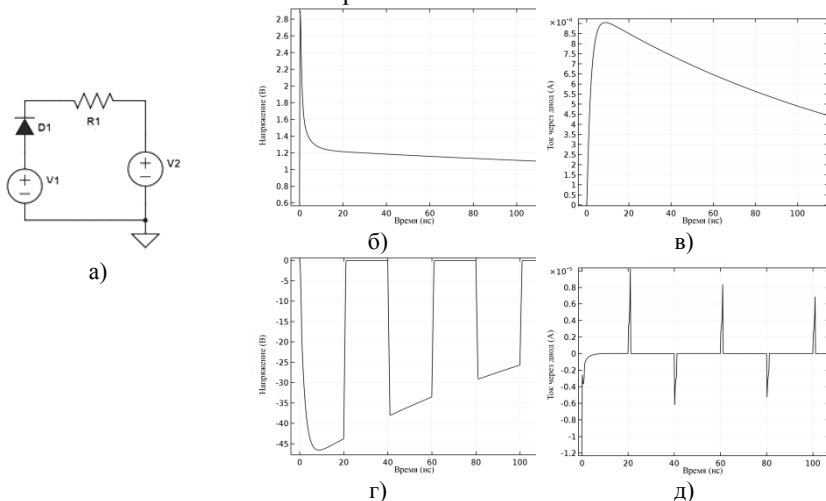


Рис.1 а) принципиальная электрическая схема включения структуры при моделировании, б),в) напряжение и ток через диод D1 при включении источника V1, г), д) напряжение и ток через диод D1 при включении источника V2

При нагрузочном сопротивлении 50 кОм процессы генерации и рекомбинации происходят преимущественно в области соприкосновения материалов р- и n- проводимостей, в областях соприкосновения с металлическими контактами наблюдается увеличение логарифма концентрации электронов и дырок. При увеличении размеров полупроводника, концентрации электронов и дырок меняют свои значения в областях омических контактов и в приграничной области между р- и n- областями.

Автор выражает благодарность при подготовке материала статьи Согояну А.В., Маврицкому О.Б., Савченкову Д.В.

Список литературы

1. Никифоров А.Ю., Скоробогатов П.К., Чумаков А.И., Яненко А.В. Экстремальная электроника. Текст лекций: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2014.
2. А. Ю. Никифоров, В. А. Телец, А. И. Чумаков, Радиационные эффекты в КМОП ИС, 1994.

Т.Х. ХУНОВ

Научный руководитель – С.Н. ПОЛЕССКИЙ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский университет «ВШЭ», Москва

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СОЕДИНЕНИЙ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

Были произведен анализ показателей долговечности различных типов соединений печатного монтажа, выбранных из двух справочников по надежности «Надежность электрорадиоизделий (ЭРИ)» и MIL-HDBK-217F. Показаны различия интенсивности отказов соединений одной технологии.

Данное научное исследование (№15-05-0029) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2015 г.

В практике выполнения электромонтажных работ при ремонте электрооборудования и эксплуатации электроустановок, наряду со сваркой, для соединения между собой деталей из однородных и разнородных металлов применяется пайка.

Пайка - сложный физико-химический процесс получения соединения в результате взаимодействия твердого паяемого (основного) и жидкого припаячного металла (припоя).

Технологии пайки:

1. Низкотемпературная пайка: ручная, полуавтоматическая, пайка волной жидкого припоя, пайка погружением в ванну с расплавленным припоем и другие.
2. Высокотемпературная пайка: пайка нагревом с помощью газовых горелок, пайка нагревом токами высокой частоты, экзотермическая пайка и другие.

В отечественном справочнике «Надежность ЭРИ», в разделе «Соединения», приведена формула, по которой считаются значения интенсивности отказов соединений при эксплуатации:

$$\lambda_3 = K_3 \times \sum_{i=1}^n N_i \times \lambda_{6i},$$

где λ_{6i} – базовое значение интенсивности отказов i – го вида соединения, N_i – количество соединений одного вида, n – количество видов соединений в устройстве, K_3 – коэффициент жесткости условий эксплуатации.

В американском справочнике MIL-HDBK-217F тоже есть раздел «Соединения», где дается формула для расчета интенсивности отказов. Она выглядит следующим образом:

$$\lambda_p = \lambda_b \times \pi_Q \times \pi_E$$

где λ_b – базовая интенсивность отказов, π_Q – показатель качества, π_E – показатель окружающей среды.

В таблице 1 приведены значения базовой интенсивности отказов различных видов соединений справочников «Надежность ЭРИ» и «MILHDBK-217F».

Таблица 1

Значения базовой интенсивности отказов различных видов соединений справочников «Надежность ЭРИ» и «MILHDBK-217F».

Вид соединения	Интенсивность отказов	
	Надежность ЭРИ	MILHDBK-217F
	$\lambda_{б1} * 10^6, 1/ч$	$\lambda_{б} * 10^6, 1/ч$
Ручная пайка без накрутки	13	0,0026
Ручная пайка с накруткой	0,7	0,00014
Пайка волной	0,69	0,000069
Сварка	0,15	0,00005
Обжимка(опрессовка)	1,2	0,00026
Беспаяное соединение накруткой	0,068	0,0000035
Скрутка	2,6	0,00012

Если сравнить две таблицы базовых интенсивностей отказов из отечественного и американского справочника, то наглядно видно насколько различаются значения. Например, для ручной пайки без накрутки интенсивность отказов в справочнике «Надежность ЭРИ» равна $\frac{1}{13000000}$, а в MILHDBK-217F - $\frac{1}{2600}$.

Как показал анализ, значение интенсивности отказов различных типов соединений в отечественном справочнике завышенные, а в иностранном заниженные. Можно сделать вывод, что при необходимости получения нижней границы использовать «MILHDBK-217F», а для получения верхней справочник «Надежность ЭРИ».

Список литературы

1. Справочник «MIL-HDBK-217f». – США, 1995. Раздел 17-1.
2. Справочник «Надежность ЭРИ». – МО РФ, 2006. С. 599.

Б.Е. ПАНЬКОВСКИЙ

Научный руководитель – С.Н. ПОЛЕССКИЙ, к.т.н., доцент
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ОЦЕНКИ КОМПЛЕКТА ЗИП

Рассматривается методики расчета комплектов ЗИП с точки зрения соответствия современным требованиям к проектировке и комплектации.

Задача сборки комплектов ЗИП, стоит еще с 80-х годов. С того времени математический аппарат не претерпел глобальных изменений, и используется до сих пор. Проблема уместить все запасные части и инструменты необходимые судну, кораблю или самолету, при этом учитывая вес компонентов, решалась зачастую так, что выставлялся приоритет на определенный критерий, на пример вес, забывали про объем, или же наоборот, учитывался объем, но забывали про вес, а уже в процессе компоновки выбирали эмпирическим путем, так чтобы комплект был ближе к необходимым параметрам. По этой причине, необходимо еще на этапе проектирования комплекта вводить много параметрические методы, которые при сборке комплекта выставляют приоритет сразу на несколько параметров, будь то, описанные выше, вес и объем.

Условное определение комплекта ЗИП следующее, комплектом ЗИП называют совокупность всех запасов конструктивных элементов, входящих в систему обеспечения работоспособности объекта [1].

Основными критериями при сборке комплектующих остаются, наибольшая достаточность при наименьшей стоимости комплекта, объем и вес комплекта, теперь же необходимо учитывать несколько параметров одновременно. Это обусловлено тем, что бывают случаи, когда отведено определенное место или же ящик под ЗИП, и если удастся, к примеру, на подложке понизить вес комплекта или объем занимаемый им, то возможно добавить что-то еще, будь то дополнительную торпеду или же юнгу.

Рассмотрим методику, представленную в учебнике Ушакова И.А. [1]. Она позволяет рассчитать 6 видов стратегий поставок запасных частей:

- Периодическое пополнение;
- Периодическое пополнение с экстренными доставками;
- Ремонт (восстановление) отказавших элементов (Неограниченное восстановление; Полностью ограниченное восстановление);
- Непрерывное пополнение запасов (в зависимости от вида распределения времени исполнения заявки на пополнение, либо

оно распределено по экспоненциальному закону, либо фиксировано).

Современная действительность показывает, что ремонт запасной части или инструмента обходится дороже и занимает больше времени, нежели полная его замена, поэтому ремонтом комплекта не занимаются. Ремонт может быть актуален лишь в случае многоуровневой системы ЗИП и в условиях таких, когда замена не возможна, но такие случаи редки и зачастую имеют частный характер. К примеру, экспедиция на полярный край, когда нет возможности для замены, из-за погодных условий или редких поставок инструментов.

В то же время в ГОСТ РВ 27.3.03-2005 [2] стратегии пополнения запасов несколько отличаются, в нем нет ремонта как такового. Так же присутствует стратегия пополнения по уровню неснижаемого запаса.

Показатель достаточности при проектировании оптимальной системы характеризуется снижением надежности пары «объект - бесконечная система ЗИП» в сравнении с надежностью пары «объект – бесконечная система ЗИП». Так же рассматривается в качестве показателя достаточности среднее время задержки в исполнении заявки на запасной элемент.

Других показателей достаточности методика не рассматривает, что показывает ее ограниченность. Нет возможности рассматривать в качестве критериев стоимость, вес, объем, или же рассматривать только критические элементы для замены, что необходимо для работы системы.

В то же время данные методы могут работать в тех случаях, когда в приоритете стоит надежность и наискорейшая замена вышедшей из строя детали, но все равно в реальной жизни не учитывать финансовую составляющую нельзя.

Так же стоит заметить, что при проектировке и оптимизации комплекта или системы ЗИП, используется лишь один критерий, как описано выше, есть необходимость в методе с возможностью выбора нескольких критериев.

Список литературы

1. Ушаков И.А. // Надежность технических систем// 1985 г.
2. ГОСТ РВ 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП
3. Черкесов Г.Н. // О критериях выбора комплектов ЗИП.
4. Жаднов В.В., Авдеев Д.К., Тихменев А.Н. // Проблемы расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП// Надежность, – 2011. №3. с.53-60.

В.А. НЕБАВСКИЙ

Научный руководитель – Р.С. СТАРИКОВ, д.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ РАСТЯЖЕНИЕ СИГНАЛА ПО ВРЕМЕНИ

В работе представлены результаты математического моделирования процесса растяжения сигнала за счёт дисперсии групповой скорости.

Целью данной работы является моделирование системы обработки сигналов, основанной на процессе растяжения сигнала по времени за счёт дисперсии групповой скорости в оптоволокне. На основе такого принципа возможно построение различных систем обработки информации, в частности аналого-цифровых преобразователей, что является перспективной и практически важной задачей [1-4]. В этом случае применение растяжения сигнала обеспечивает снижение требований к скорости проведения дискретизации, что позволяет построить «быстрый» аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на основе имеющихся «медленных», то есть сделать возможным выполнение преобразования коротких и/или быстрых сигналов с использованием АЦП с малой частотой выборки.

Принцип действия системы с оптическим растяжением иллюстрируется рис. 1. Суперконтинуум генерирует широкополосный оптический импульс, который при прохождении первой диспергирующей среды растягивается так, что его спектральные компоненты следуют друг за другом. Далее полученный оптический ЛЧМ-импульс модулируется по интенсивности входным радиосигналом при помощи модулятора света (как правило используется модулятор Маха-Цандера). Проходя вторую диспергирующую среду сигнал растягивается по времени с коэффициентом растяжения, определяющимся отношением дисперсии 1й и 2й диспергирующих сред: $M=1+D_2/D_1$. Растянутый сигнал принимается на фотодиоде и обрабатывается АЦП.

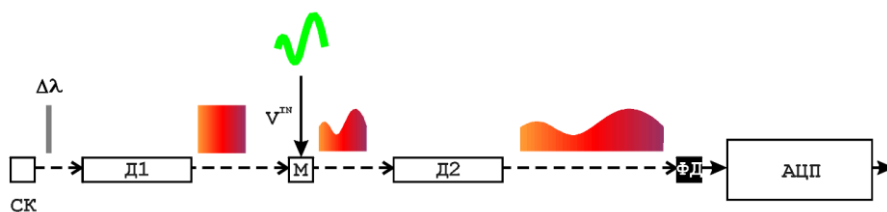


Рис. 1. Схема обработки сигналов в радиофотонной системе измерения с оптическим растяжением: СК – суперконтинуум, Д1 - оптоволокно с дисперсией, М – модулятор, Д2 - оптоволокно с дисперсией, ФД – фотодиод, АЦП - аналого-цифровой преобразователь

Для моделирования системы создано программное обеспечение, реализующее математические модели её элементов для которых были введены различные варьируемые параметры, в том числе:

- ширина спектра суперконтинуума
- шумы суперконтинуума
- дисперсионные характеристики волоконных элементов,
- модуляционная характеристика модулятора,
- АЧХ модулятора,
- чувствительность фотодетектора,
- АЧХ фотодетектора,
- шумы фотодетектора,
- эффективное число бит АЦП.

В качестве рабочего оптического диапазона выбран стандартный 1,5 мкм диапазон. Учёт перечисленных параметров позволяет показать их влияние на отношение сигнал/шум на выходе рассматриваемой системы, а значит охарактеризовать выполняемое ей аналого-цифровое преобразование.

Список литературы

1. Caputi W. "Stretch: a time-transformation technique" // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., v.AES-7, 269-278 (1971)
2. Valley G. "Photonic analog-to-digital converters" // Opt. Expr., v.15, 1955-1982 (2007)
3. Fard A., Gupta S., Jalali B. "Photonic time-stretch digitizer and its extension to real-time spectroscopy and imaging" // Laser Photon. Rev., v.7, 207-263 (2013)
4. Старилов Р. «Фотонные АЦП» // Успехи современной радиоэлектроники, 2015, №2, стр.3-39 (2015)

Д.С. ОВЧИННИКОВ, И.С. МАЦАК

Научный руководитель – В.Ю. ТУГАЕНКО, к.ф.-м.н.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, Королёв

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С ПАССИВНЫМ ПЕРЕДАТЧИКОМ

В работе рассматривается вариант создания оптической линии связи на основе пассивного передатчика в виде ретрорефлектора с управляемой дифракционной решеткой. В работе рассмотрены основы оптической связи с пассивным передатчиком и перспективы создания системы связи на этом принципе.

Оптическая связь в настоящее время обладает значительным потенциалом, так как оптический диапазон практически не используется для связи. А радиочастотный диапазон перегружен, учитывая огромное количество пользователей беспроводной связи. Одним из наиболее перспективных направлений оптической связи является лазерная связь, один абонент которой является активным, а другой пассивным. Активный абонент производит поиск цели для связи, осуществляет наведение луча, передающего информацию. Пассивный абонент производит повторное модулирование управляемой дифракционной решеткой, расположенной на ретрорефлекторе, обеспечивающем оправку луча в обратную сторону с высокой точностью [1, 2]. Это позволяет значительно уменьшить аппаратуру на одном из двух узлов связи. Использование такого модулятора позволяет создавать передатчики большой площади и увеличивать расстояния между точками связи без повышения мощности излучения.

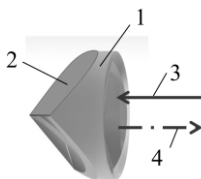


Рис. 1. Ретрорефлектор с управляемой дифракционной решеткой

Список литературы

1. Peter G.G. et al. Modulating retro-reflector lasercom systems at the Naval Research Laboratory // Mil. Commun. Conf. IEEE, 2010. P. 1601–1606.
2. Goetz P.G. et al. High-speed large-area surface-normal multiple quantum well modulators // Proc. SPIE 5160, Free. Laser Commun. Act. Laser Illum. III. International Society for Optics and Photonics, 2004. P. 346–354.

А.Е. РАЗУВАЕВ, И.С. МАЦАК

Научный руководитель – В.Ю. ТУГАЕНКО, к.ф.-м.н.
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва, Королёв

РАЗРАБОТКА ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА С ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗЫ

В работе рассматриваются преимущества пассивного охлаждения мощных лазерных диодов и их сборок с помощью системы на основе тепловых труб и материалов с изменением фазы в температурном диапазоне 20–40°C. Для проведения исследований были проведены тепловые расчеты и создан макет теплового аккумулятора. Проведенные экспериментальные исследования показали возможность поддержания температуры лазерного диода, работающего непрерывно-периодическом режиме без затрат дополнительной мощности на охлаждение.

Эффективность современных мощных лазерных диодов составляет от 50 до 70 % [1, 2]. Однако эффективность лазерных систем «от розетки» не превосходит 20–30%. Одной из систем потребляющих значительную мощность является система охлаждения, состоящая из элементов Пельтье и насосов, прокачивающих жидкий теплоноситель. При снижении электропотребления системы охлаждения становится возможным создание лазерной системы с полным КПД 40–50%.

В работе рассматривается вариант пассивной системы охлаждения, позволяющей работать несколько часов на полной мощности без потребления мощности на охлаждения. Схема мощной лазерной системы с охлаждением с помощью тепловых труб и теплоаккумулирующего материала с изменением фазы показана на рис. 1.

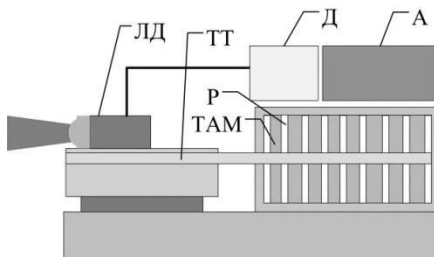


Рис. 1. Лазерная система с пассивным охлаждением: ЛД - лазерный диод, Д - драйвер лазерного диода, А - аккумуляторная батарея, ТТ - тепловая труба, ТАМ - теплоаккумулирующий материал, Р - алюминиевые ребра

Тепло, выделяемое лазерным диодом, передается с помощью тепловых труб в тепловой аккумулятор, представляющий собой радиатор, погруженный в теплоаккумулирующий материал, который имеет температуру фазового перехода, близкую к необходимой для поддержания температуры излучателя. Система передачи тепла от лазера к аккумулятору имеет низкое тепловое сопротивление, что обеспечивает поддержание температуры лазера в узких пределах. В качестве тепловых материалов могут использоваться ряд материалов, в частности, алканы [3, 4].

Для проведения экспериментальных исследований был создан макет, представленный на рис. 2. В качестве теплоаккумулирующего материала был использован октадекан с температурой плавления 28°C. Объем теплоаккумулирующего материала составил 0.5 л. В качестве модели лазерного диода использовался электрический нагреватель мощностью 40 Вт. Экспериментальные исследования показали возможность поддержания температуры пластины нагревателя мощностью 40 Вт в диапазоне 30–35°C в течение 50 минут. Это позволяет использовать результаты для создания лазерной системы с пассивным охлаждением по предложенному принципу.

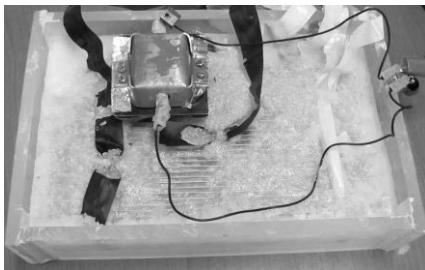


Рис. 2. Макет теплового аккумулятора

Список литературы

1. Crump P. Efficient High-Power Laser Diodes / P. Crump, G. Erbert, H. Wenzel, C. Frevert, C. M. Schultz, K.-H. Hasler, R. Staske, B. Sumpf, A. Maassdorf, F. Bugge, S. Knigge, G. Trankle // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2013. – Т. 19 – № 4 – 1501211–1501211c.
2. Crump P. 360 W and 70% efficient GaAs-based diode lasers / P. Crump, J. Wang, T. Crum, S. Das, M. DeVito, W. Dong, J. Farmer, Y. Feng, M. Grimshaw, D. Wise, S. Zhang // Proc. SPIE 5711, High-Power Diode Laser Technol. Appl. III – 2005. – 21–29c.
3. Sharma A. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2009. – Т. 13 – № 2 – 318–345c.
4. Zalba B. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications / B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, H. Mehling // Appl. Therm. Eng. – 2003. – Т. 23 – № 3 – 251–283c.

П.Ю. РОГОВ

Научный руководитель – В.Г. БЕСПАЛОВ, д.ф.-м.н.
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ГЛАЗА И КОЖНЫЕ ПОКРОВЫ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Представлены математические модели линейных и нелинейных процессов, возникающих при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на кожные покровы и модельную среду человеческого глаза. Для моделирования распространения излучения в прозрачных тканях методами численного моделирования выполнено решение нелинейного спектрального уравнения, описывающего динамику двумерного ТЕ-поляризованного излучения в однородной изотропной среде с кубичной безынерционной нелинейностью. Для воздействия на мутные среды, описан механизм воздействия и проведен анализ и получено численное решение системы уравнений, описывающих динамику электронной и атомной подсистемы. Модели учитывают возникновение нелинейных эффектов.

Фемтосекундные лазерные системы в настоящий момент широко используются в технических приложениях и медицинской технике [1, 2]. Но, несмотря на это, в настоящее время в Российской Федерации на настоящий момент не существует стандартов по безопасным уровням энергии фемтосекундного лазерного излучения [3]. Существенное отличие механизмов воздействия, интенсивного фемтосекундного лазерного излучения и импульсов большей длительности обусловлено возникновением нелинейных эффектов. Вследствие высокой плотности мощности может возникать самофокусировка, двух- и трех-фотонное поглощение, многофотонная и ударная ионизация, в связи малой длительностью – дисперсионное расплывание импульса во времени и, при высокой плотности энергии – оптический пробой [4]. Особенно актуален вопрос воздействия фемтосекундного излучения на биологические ткани, так как мощное фемтосекундное излучение может нести существенную опасность для зрения, кожных покровов и внутренних органов человека.

В связи с тем, что в биологических тканях основное содержание приходится на молекулы связанной с белком и несвязанной воды, в моделях рассматривается механизм ионизации молекул воды и затем передача энергии фононной подсистеме молекул белка.

Распространение фемтосекундного излучения в оптических средах глаза было рассмотрено с помощью численного моделирования. Пред-

ставлена динамика процесса дисперсионного уширения и самофокусировки фемтосекундного излучения вблизи глазного дна. Выяснено, что основным механизмом повреждения при использовании лазера на титан-сапфире (800 нм) является фотоионизация, так как длительность импульса излучения вблизи глазного дна имеет значение порядка 100 фс, даже при длительности падающего импульса 10 фс. При значении плотности мощности на входе в глаз больше 10^6 Вт/см² вблизи глазного дна будет возникать явление самофокусировки в непосредственной близости от сетчатки, что, в сравнении с непрерывным излучением, может приводить к серьезным повреждениям при меньшей интенсивности, что соответствует экспериментальным данным, приведенным в American National Standard for the Safe Use of Lasers [5]. Представлена математическая модель распространения фемтосекундного излучения при попадании на кожный покров. С помощью численного моделирования методом Монте-Карло [6]. Определена зависимость интенсивности излучения от глубины проникновения. С помощью аналитического решения системы уравнений, описывающих электронный баланс между электронной и атомной подсистемой, рассмотрен механизм воздействия фемтосекундного излучения на кожу и произведена оценка временных процессов протекающих при взаимодействии фемтосекундного излучения на кожу.

Список литературы

1. Ахманов С.А., Вислоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.:Наука, 1988.
2. Rulliere C. Femtosecond laser pulses. Springer, Ed. Rulliere C. 2005.
3. ГОСТ Р 50723-94: Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при работе и эксплуатации лазерных изделий. М.:Издательство стандартов, 1995.
4. Sati P., Verma U., Tripathi V.K. Self-focusing and frequency broadening of laser pulse in water // Physics of Plasmas. 2014. V.21. No.11. P..112110.
5. Standard A. Z136. 1–2007. American National Standard for the Safe Use of Lasers. 2007.
6. Пушкарева А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани: учебное пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2008.

Д.С. ФАРРАХОВА¹, Ю.О. КУЗНЕЦОВА¹

Научный руководитель – В.Б. ЛОЩЕНОВ^{1,2}, д.ф.-м.н.

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

²Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Москва

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛЮОРЕСЦЕНТНАЯ ДИАГНОСТИКА РАННЕЙ СТАДИИ КАРИЕСА С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ

В данной статье рассмотрена возможность применения лазерно-спектроскопического метода для определения локализаций микротрещин эмали с использованием наночастиц фталоцианина алюминия в качестве маркера. Были получены спектры аутофлуоресценции здоровой области и с микроповреждениями на поверхности эмали, а также спектры флуоресценции наночастиц фталоцианина алюминия, смешанные с порошком эмали зуба.

Микротрещины на поверхности эмали, вызванные механическими воздействиями или деминерализацией зубов со временем могут привести к кариозным повреждениям и даже разрушению и потере зубов.

Поскольку в микроповреждениях скапливается патологическая микрофлора, были исследованы и сопоставлены спектры аутофлуоресценции от здоровой эмали и содержащей микротрещины зуба, удаленного по клиническим показаниям. Интенсивности флуоресценции практически равны, как и в исследованиях С.Ю. Васильченко и его коллег [1].

Для дальнейшего исследования была смешана растертая в порошок эмаль с наночастицами фталоцианина алюминия, для некоторых измерений были добавлены слюна и дистиллированная вода, для приближения среды микрофлоры в полости рта. Спектры были получены на длине волны возбуждения 632,8 нм, с помощью установки на основе лазерного электронного спектро-анализатора «LESA-01-Biospec» (рис. 1).

Интенсивность флуоресценции наночастиц фталоцианина алюминия значительно выше, чем интенсивность флуоресценции здоровой эмали и порошка эмали.

Данный эксперимент показывает, что наночастицы могут служить в качестве маркера, застревая в микроповреждениях эмали, для точного обнаружения их нахождения, а также для заживления поверхности зуба. Подобный метод позволит предотвратить дальнейшее повреждения зуба и проводить профилактику различных патологических процессов.

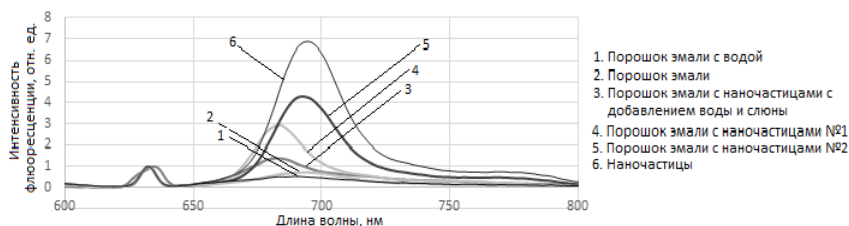


Рис. 1. Спектры флуоресценции эмали с наночастицами фталоцианина алюминия на длине волны возбуждения 632,8 нм

Список литературы

1. Васильченко С.Ю., Волкова А.И., Лощенов В.Б., Синяева М.Л., Мамедов А.А., Лукьянец Е.А., Кузьмин С.Г. Исследование флуоресцентных свойств наночастиц фталоцианина алюминия в микроповреждениях эмали зуба // Российский биотерапевтический журнал. 2006. Т.5. №2. С.78-79.

А.С. ШАРОВА¹, Ю.С. МАКЛЫГИНА²

Научный руководитель – В.Б. ЛОЩЕНОВ^{1,2}, д.ф.-м.н.

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова

БАКТЕРИОХЛОРИН В РОЛИ ИК-ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ТЕРАПИИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ОПУХОЛЕЙ МОЗГА

В работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных свойств бактериохлорина в фантоме мягкой ткани головного мозга. Приведено описание экспериментальной установки, также представлен анализ спектров поглощения и флуоресценции раствора бактериохлорина. Отмечены перспективы использования бактериохлорина в качестве ИК-фотосенсибилизатора.

В настоящее время наиболее эффективными методами выявления и борьбы с онкологическими заболеваниями являются флуоресцентная диагностика (ФД) и фотодинамическая терапия (ФДТ). Эти методы основаны на воздействии лазерного излучения на светочувствительное вещество (фотосенсибилизатор) [1]. В последние годы ведется направленный поиск новых фотосенсибилизаторов с улучшенными свойствами: наличием ин-

тенсивной полосы поглощения в дальней красной и ближней инфракрасной областях спектра.

Целью настоящего исследования является изучение спектроскопических свойств раствора ИК-фотосенсибилизатора бактериохлорина *in vitro*, с перспективой дальнейшего его использования в качестве ИК-фотосенсибилизатора для диагностики и терапии глубокозалегающих опухолей мозга. Были изучены оптические свойства мозговой ткани и создан аналог (фантом) биоткани, что позволило изучать свойства фотосенсибилизатора в сложной оптической среде.

При помощи волоконно-оптического спектроанализатора ЛЭСА-01-БИОСПЕК сняты спектры собственной флуоресценции фантома мягкой ткани головного мозга и флуоресценции фантома с раствором бактериохлорина при возбуждении лазерными источниками с длинами волн: $\lambda = 405$ нм; 532 нм, выбранные в соответствии с максимумами спектра поглощения препарата (рис. 1).

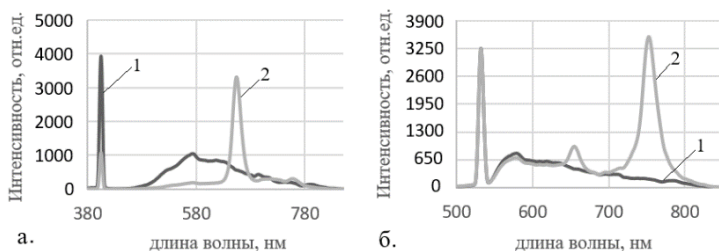


Рис. 1. Спектр флуоресценции фантома мягкой мозговой ткани (1), фантома с раствором бактериохлорина (2) при возбуждении лазерным излучением с длиной волны а) $\lambda = 405$ нм; б) $\lambda = 532$ нм

В ходе исследования был получен спектр флуоресценции бактериохлорина с выраженным максимумом на длине волны 752 нм, что относится к ближней ИК-области спектра. Ввиду минимального собственного поглощения биоткани в этом диапазоне спектра, можно говорить о перспективности использования исследуемого препарата в качестве ИК-фотосенсибилизатора для повышения глубины фотодинамического воздействия (до 2 см). Таким образом, применение бактериохлорина позволит анализировать более глубокие слои биоткани, что очень важно при диагностике и терапии опухолей мозга с глубокой локализацией.

Список литературы

1. Loschenov V.B., Konov V.I., Prokhorov A.M. Photodynamic therapy and fluorescence diagnostics // Laser Physics. 2000. T.10. №6. P.1188–1207.

Е.В. ОСИПОВ, Д.С. ДОВЖЕНКО

Научные руководители – А.А. ЧИСТЯКОВ, д.ф.-м.н., профессор

И.Л. МАРТЫНОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ТУШЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ, ВНЕДРЕННЫХ В МИКРОРЕЗОНАТОР ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПАРОВ НИТРОАРОМАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В работе исследовался эффект тушения фотолюминесценции сопряженных полимеров из класса polyphenylenevinylene (PPV), внедренных в микрорезонаторы из пористого кремния, под действием паров нитроароматических соединений. Показано, что исследуемые полимеры при внедрении в микрорезонаторы сохраняют высокую чувствительность к парам нитроароматических соединений, при этом их спектр люминесценции значительно сужается. Обсуждаются перспективы создания высокочувствительного сенсора взрывчатых веществ.

Несмотря на то, что существующие методы внелабораторного детектирования паров и следов взрывчатых веществ (ВВ) – спектрометрия ионной подвижности, газовая хроматография – являются экспрессными и высокочувствительными [1], потребность в создании портативных автономных устройств сенсорного типа для регистрации ВВ в настоящее время только возрастает. В связи с этим перспективным является развитие сенсорных технологий, основанных на эффекте тушения люминесценции сопряженных полимеров. В основе эффекта тушения лежит процесс фотоиндуцированного переноса электрона с возбужденной молекулярной орбитали полимера на молекулярную орбиталь молекулы ВВ. Особый интерес представляет внедрение полимеров в пористые матрицы со свойствами фотонного кристалла, например, в микрорезонаторы (МР) из пористого кремния (ПК), что позволяет эффективно управлять спектром люминесценции различных люминофоров [2].

В работе исследовались спектрально-люминесцентные характеристики полимеров класса polyphenylenevinylene (PPV) с высоким квантовым выходом люминесценции: MDMO-PPV и ВЕНР-PPV, внедренных в МР из ПК. Микрорезонаторы изготавливались методом электрохимического травления кремния в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты. Длина волны собственной моды МР находилась в диапазоне 550-600 нм. Значение добротности составляло $Q \sim 70$. После внедрения в пористую

матрицу спектр люминесценции полимеров сужался в соответствии с параметрами собственной моды микрорезонатора. Характерная ширина спектра составляла менее 10 нм.

Воздействие паров тринитротолуола (ТНТ) приводило к падению амплитуды сигнала люминесценции созданных образцов. Показано, что при концентрации паров ТНТ, равной насыщенной при 30⁰С ($p_{\text{нас}} = 2 \cdot 10^{-10}$ г/см³) падение амплитуды на 60% происходит за 5 секунд; воздействие парами ТНТ при комнатной температуре (21⁰С, $p_{\text{нас}} = 5 \cdot 10^{-11}$ г/см³) снижает амплитуду сигнала на 20% за 15 секунд. Проведено сравнение стабильности люминесцентных характеристик полимерных образцов на основе МР и тонкой полимерной пленки на кварцевой подложке. Показано, что в условиях облучения солнечным светом, излучением светодиода и в условиях полной темноты время фотостабильной работы образцов на основе МР может на порядок превышать аналогичный показатель для пленки. Установлено также, что чувствительность к детектированию ТНТ для образцов на основе МР из ПК, не хуже, чем чувствительность тонкой полимерной пленки. При этом большая удельная площадь поверхности ПК и эффект обужения спектра люминесценции полимеров в МР дают дополнительные возможности для создания эффективных систем сорбции паров ВВ и регистрации люминесцентного сигнала низкой интенсивности, что в перспективе позволит создать высокочувствительный сенсор взрывчатых веществ.

Список литературы

1. Martynov I.L. et. al. // Tech. Phys. Lett. 2011. V.37. No.1. P.15-18.
2. Dovzhenko D.S. et al. // Proceedings of SPIE. 2014. V.9126. P.91263O.

Д.С. ДОВЖЕНКО, Е.В. ОСИПОВ

Научные руководители – А.А. ЧИСТЯКОВ, д.ф.-м.н., профессор

И.Л. МАРТЫНОВ, к.ф.-м.н., доцент

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЮМИНОФОРОВ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

В работе экспериментально и теоретически исследовался эффект усиления спонтанного излучения люминофоров, внедренных в фотонные кристаллы на базе пористого кремния. В качестве люминофоров использовались полупроводниковые квантовые точки и полимеры класса polyphenylenevinylene (PPV). Были проведены расчеты оптических характеристик гибридных систем, представляющих собой люминофоры, внедренные в фотонные кристаллы методом конечных разностей во временной области (FDTD). Показано, что при внедрении люминофоров внутрь фотонного кристалла происходит усиление спонтанного излучения на резонансной длине волны фотонного кристалла. Результаты данной работы позволят значительно повысить чувствительность сенсоров на основе фотонных кристаллов из пористого кремния, а также упростить производство конечных сенсорных систем.

В настоящее время существует множество сенсорных систем для диагностики малых концентраций различных веществ: маркеров заболеваний в биологических жидкостях, взрывчатых и наркотических веществ в газовой фазе [1, 2]. Одними из наиболее компактных и чувствительных являются сенсоры на основе фотонных кристаллов, обеспечивающие высокую чувствительность за счет наличия резонансных свойств и сильного влияния показателя преломления среды на их оптические свойства. При этом наиболее распространенными являются сенсоры, в которых отслеживается сдвиг резонансной полосы вследствие попадания частиц, имеющих отличный от среды показатель преломления внутрь структуры. Такой метод, однако, требует достаточно сложной и дорогостоящей аппаратуры для детектирования, что делает невозможным широкое использование сенсоров такого типа. В данной работе исследуется новый тип сенсоров, основанных на внедрении в фотонные кристаллы люминофоров, максимум спектра люминесценции которых совпадает с резонансной длиной волны фотонного кристалла. В этом случае детектируемой величиной

становится интенсивность излучения в узком диапазоне частот, вследствие чего значительно упрощается система детекции для конечного сенсора.

В рамках данной работы на базе пористого кремния были изготовлены методом электрохимического травления фотонные кристаллы, в частности, микрорезонаторы, представляющие собой два брэгговских зеркала, содержащих резонансный слой между ними. В качестве подложки использовались монокристаллические пластины высоколегированного кремния р-типа. После изготовления микрорезонаторы подвергались окислению для стабилизации оптических свойств. После чего в них внедрялись люминофоры (квантовые точки и полимеры) в жидкой фазе. В нашей работе исследованы фундаментальные оптические характеристики подобных систем. Экспериментально и теоретически исследованы спектры, кинетика и пространственное распределение люминесценции. Показано усиление люминесценции люминофоров на резонансной длине волны вследствие эффекта Парселла. Показано влияние глубины внедрения на оптические свойства сенсорного элемента и как следствие чувствительность сенсоров.

Список литературы

1. Martynov I.L., et. al. Ion mobility spectrometer with ion source based on laser-irradiated porous silicon // Tech. Phys. Lett. 2011. V.37. No.1. P.15-18.
2. Threm, D., et al. Photonic crystal biosensors towards on-chip integration. // J. Biophot. 2012. V.5. P.601–616.

Е.К. ПЕТРОВА

Научный руководитель – Р.С. СТАРИКОВ, д.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВАРИАНТНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ПОВОРОТА

Приводятся результаты исследований по применению инвариантных корреляционных фильтров при распознавании цветных изображений.

Использование при распознавании изображений информации о цвете «объектов интереса» почти всегда позволяет повысить качество распознавания. Общеизвестно, что в случае более сложных изображений, например, цветных фотографий, отдельно взятые цветовые каналы могут оказаться более информативными при распознавании, чем полутоновое чёрно-белое представление. В настоящей работе рассматривается возможность инвариантного корреляционного распознавания на основе применения корреляционных фильтров с минимизацией шума и энергии корреляции (КФ МШЭК) [1], в частности такие фильтры могут обеспечивать распознавание полутоновых изображений на сложном фоне, а также в присутствии пространственного шума. Ранее проведённые исследования показали достижимость высоких характеристик распознавания с помощью КФ МШЭК. Для первоначального моделирования были взяты изображения простых объектов на равномерном фоне. Предполагалась необходимость различения истинного объекта от ложных трёх типов. Размеры изображений – 512x512 пикс, глубина цвета 16 бит, использовалась стандартная модель цвета RGB. Цвет объектов и фона выбирался схожим (зелёный), но в цвете объекта отсутствовала синяя составляющая, а в цвете фона - красная. Рис. 1 иллюстрирует разницу просто полутонового чёрно-белого представления исходного цветного изображения и одного из его цветовых каналов.

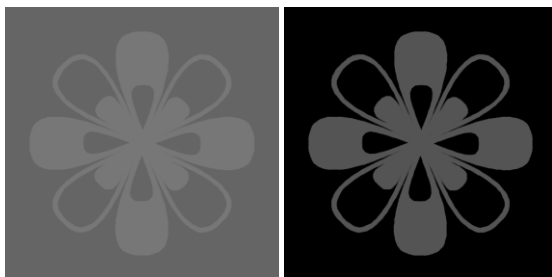


Рис. 1. Полутоновое чёрно-белое изображение истинного объекта и его же изображение, полученное по красному каналу RGB

Были синтезированы различные варианты КФ МШЭК, обеспечивающие инвариантность к повороту, использовались различные условия их синтеза [2]. Распознавание изображений красного канала обеспечило в лучших случаях вероятность правильного решения, оценивавшуюся по критерию Неймана-Пирсона свыше 99%. Также были получены результаты распознавания истинного объекта на фоне сложной сцены, содержащей также изображения ложных объектов. Таким образом, продемонстрированы принципиальные возможности инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений с использованием КФ МШЭК. Дальнейшие работы предполагают исследование распознавания более сложных изображений и количественную оценку возможного улучшения качества распознавания при варьировании информации цветовых каналов при синтезе фильтров.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-19-01751.

Список литературы

1. Ravichandran G., Casasent D.P. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter // Appl. Opt. 1992. V.31. P.1823-1833.
2. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V.8398. P.83980G.

Е.К. ПЕТРОВА, С.С. ПЬЯНКОВ

Научный руководитель – Р.С. СТАРИКОВ, д.ф.-м.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИНТЕЗА ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННЫХ НАСТРОЕЧНЫХ НАБОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЁМ МАНИПУЛЯЦИИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РЕАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Приводятся результаты исследований по синтезу инвариантных корреляционных фильтров на основе ограниченного числа эталонных изображений.

При синтезе инвариантного корреляционного фильтра (КФ) количество изображений в настроечном наборе фильтра (ННФ), используемом определяет качество распознавания, в частности для КФ с минимумом шума и энергии корреляции (МШЭК) [1], используемого в данной работе возможно достижение вероятности правильного распознавания более 99% при использовании НФ из десятков-сотен изображений [2]. На практике, часто, изображения ННФ должны быть получены а-приори фоторегистрацией, при решении ряда практических задач сформировать таким образом ННФ часто затруднительно. Поэтому, определённый интерес представляет подход, основанный на использовании в ННФ изображений, полученных искусственным путём на основе ограниченного количества реальных фотографий. В данной работе для создания таких искусственных изображений из реальных использовались изменения яркости и контраста. В принципе, такой подход отвечает некоторым практически важным постановкам задачи распознавания, например, задаче распознавания аэрофотоснимков, полученных в разных условиях освещённости и при разных атмосферных условиях.

Было проведено моделирование со следующими параметрами: размер изображений 512x512, 256 градаций серого. В качестве ННФ взяты 9 разных фото одной местности. В качестве результата работы КФ были получены его кросс-корреляции для каждого из исходных изображений, а также для изображения, имеющего низкое качество по разрешению и контрасту. Все изображения, вошедшие в фильтр, дали высокий узкий пик. Для изображения с низким уровнем резкости, пик имеет ту же форму, но ниже.

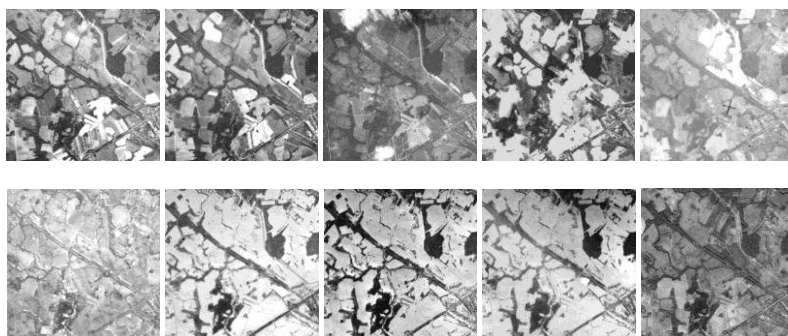


Рис. 1. Эталонные изображения, и изображения с плохими контрастом и резкостью, не использовавшееся при синтезе КФ (нижнее правое)

Был исследован простейший вариант ННФ, составленного с использованием искусственных изображений. КФ был синтезирован на основе набора, в состав которого вошли 3 реальных изображения и по 2 изображения, полученных из них изменением яркости и контраста. Такой КФ обеспечил правильное распознавание всех изображений рис. 1. Таким образом показана принципиальная применимость рассматриваемого метода.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-19-01751.

Список литературы

1. Ravichandran G., Casasent D.P. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter // Appl. Opt. 1992. V.31. P.1823-1833.
2. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V.8398. P.83980G.

Т.А. ВОВК, Т.Ю. НИКОЛАЕВА
Научный руководитель – Н.В. ПЕТРОВ, к.ф.-м.н.
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

КАЛИБРОВКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОБЪЕМА С ЧАСТИЦАМИ НА ОСНОВЕ ОТНОШЕНИЯ ПИКА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ К ПЬЕДЕСТАЛУ

В данном сообщении исследуется новый метод характеристики взвешенных в объеме однотипных сферических частиц с помощью отношения пика корреляционной функции к пьедесталу. Корреляционная функция рассчитывается для двух соседних слоев объема, содержащих частицы. Метод был изучен с помощью численного моделирования, а также был проверен экспериментально.

Предложен новый метод определения концентрации частиц в объеме на основании отношения пика корреляционной функции, рассчитанной для двух записанных в соседних плоскостях изображений частиц, к ее пьедесталу. Изображения получаются путем записи осевых голограмм по методу Габора, восстанавливаемых численным моделированием распространения когерентного волнового фронта в плоскости (слое) объема. Данный метод записи голограмм-изображений взвеси частиц в объеме был рассмотрен ранее в [1, 2, 3].

Для оценки эффективности данного метода как инструмента была создана программная модель, позволяющая исследовать предложенный метод на большой статистической выборке. На первом этапе послойно формируется объем с частицами, для которых заданы определенные распределение, размеры и количество частиц, затем в этом объеме моделируется распространение когерентного волнового фронта (голограмма Габора). На следующем шаге производится обратное распространение волнового фронта от полученной голограммы и восстановление двух изображений объема – соседних слоев, содержащих сфокусированные частицы. На третьем этапе от двух изображений берется функция взаимной корреляции, для которой вычисляется параметр – отношение пика этой функции к ее пьедесталу. Процесс многократно повторяется с изменением концентрации и размеров частиц.

Отношение пика корреляционной функции к пьедесталу между сечениями соседних слоев объема возрастает с увеличением концентрации частиц что обусловлено увеличением неповторяющихся элементов изображений.

Было показано, что численное моделирование, проведенное с помощью графической среды программирования LabView, повторяет экспериментальные данные с большой долей точности. При обширной статистической выборке метод может быть откалиброван для частиц с определенными характеристиками и впоследствии может быть использован для быстрого детектирования, измерения и учета частиц в объеме, например, в задачах биологии и океанологии (учет планктона в морской воде), в изучении динамики потоков частиц, в исследовании прозрачных сред, в таких практических задачах, как впрыск топлива, сельскохозяйственные спреи, фармацевтика и другие.

Исследование зависимости отношения пика к пьедесталу функции корреляции от концентрации частиц показало, что в общем случае равномерного распределения частиц в объеме эта зависимость является линейной.

Список литературы

1. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. Characterization of particles suspended in a volume of optical medium at high concentrations by coherent image processing // Opt. Eng. 2015. V.54(8). P.101.
2. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. Statistical study of coherent images of particles in the volume of optical medium // Proc. SPIE. 2014. V.9216. P.921612.
3. Николаева Т.Ю., Петров Н.В. Исследование объема с высокой плотностью частиц на основе контурного и корреляционного анализа изображений // Вестник ИТМО. 2014. Т.94(6). С.15-21.

Т.Ю. НИКОЛАЕВА

Научный руководитель – Н.В. ПЕТРОВ, к.ф.-м.н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ МЕТОДАМИ ПОРОГОВОЙ ОБРАБОТКИ И «ШАХМАТНОЙ ДОСКИ»

В данной работе рассмотрены методы пороговой обработки изображений и «шахматной доски» для задач статистического анализа распределений частиц. В результате численного исследования проведена оценка эффективности применения алгоритмов пороговой обработки сфокусированных изображений частиц и обработки спекл-изображений методом «шахматной доски» для задачи идентификации частиц в объеме.

Необходимость изучения частиц различной природы, распределенных в объеме среды, возникает во многих научных задачах атмосферной опти-

ки [1], океанографии, биологии и медицины [2], а также в большом количестве практических задач [3].

В данной работе объектом исследования являлось тестовое распределение рассеивающих микрочастиц в объемной среде. Объем моделировался как набор сегментов с распределением частиц необходимого размера и концентрации. В методе, основанном на оконтуривании и пороговой обработке и подробно изложенном в работе [4], для получения характеристик распределений частиц в объеме обрабатывались сфокусированные изображения частиц, расположенных в различных плоскостях объема. Было продемонстрировано, что данный метод позволяет исследовать объемы с высокой концентрацией частиц.

В данной работе возможности указанного метода сравниваются с методом «шахматной доски» [5], который хорошо зарекомендовал себя в задачах обработки спекл-структур. В ходе ранее проведенных исследований в этой области, метод «шахматной доски» показал очень высокую чувствительность: изменение размера спекла на несколько пикселей, приводит к существенной деформации корреляционных пиков [6]. В связи с этим, интерес представляет определение потенциала данного метода в задачах идентификации частиц в водной среде.

В отличие от методов корреляционного и вейвлет анализа, метод шахматной доски эффективно использует информацию со всего поля зрения. При этом, основным его преимуществом перед методом оконтуривания и пороговой обработки является меньшая вычислительная сложность, и как следствие, меньшее время обработки данных.

Список литературы

1. Воронцовский А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И. // Оптический Журнал. 2012. Т.79. №1. С.18–24.
2. Kim W.H., et al. // Journal of the Optical Society of Korea. 2010. V.14. No.1. P.42–48.
3. Carter R.M., Yan Y., Tomlins K. // Measurement Science and Technology. 2006. V.17. No.2. P.235.
4. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. // Optical Engineering. 2015. V.54. No.8. P.083101.
5. Малов А.Н., Неупокоева А.В. // в кн. Голография. Наука и практика. Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо–2013». М.: ООО «МНГС», 2013. С.257–264.
6. Лагошный И.С., Павлов П.В., Малов А.Н., Неупокоева А.В. // XIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов. 2015. С.32–38.

А.В. ШИФРИНА

Научный руководитель – Н.Н. ЕВТИХИЕВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ И УВЕЛИЧЕНИЯ КРИПТОСТОЙКОСТИ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ ЗА СЧЁТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВХОДНЫХ АМПЛИТУДНЫХ МАСОК

Предложены методы использования входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением для повышения отношения сигнал/шум в декодированных изображениях, а также для повышения визуальной скрытности кодированных изображений.

В настоящее время активно развиваются методы оптического кодирования информации. Методы, использующие пространственно-некогерентное освещение, обладают рядом существенных преимуществ.

Для повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) в декодированном изображении и повышения визуальной скрытности кодированного изображения разработаны две группы методов применения входных амплитудных масок (АМ): разрежения и взаимодополняющих масок.

Методы разрежения основаны на наложении на кодируемое изображение АМ в виде бинарной двумерной решётки или её создания путём разрежения исходного изображения. Наложение решётки приводит к мультиплицированию спектра изображения. При декодировании это сохраняет большее количество информационных частот.

На рис. 1 представлен результат применения АМ. Эффективность метода оценивалась по увеличению ОСШ по сравнению с кодированием без АМ. По оси абсцисс отложено отношение величины пика на нулевой пространственной частоте в спектре ключа к среднему уровню его спектра (ОПС). Данный параметр напрямую связан с криптостойкостью ключа. Наиболее эффективный метод группы разрежения показал среднее увеличение ОСШ по сравнению с кодированием без АМ в 2 раза.

Возможно совместное использование методов разных групп с целью обеспечения одновременного увеличения ОСШ и повышения визуальной скрытности. На рис. 2 представлены примеры кодированных и декодированных изображений.

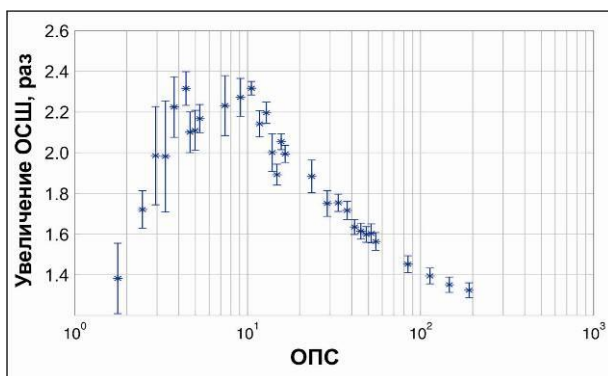


Рис. 1. Зависимость величины увеличения отношения сигнал/шум при применении входной АМ по сравнению с кодированием без АМ от ОПМ ключей кодирования

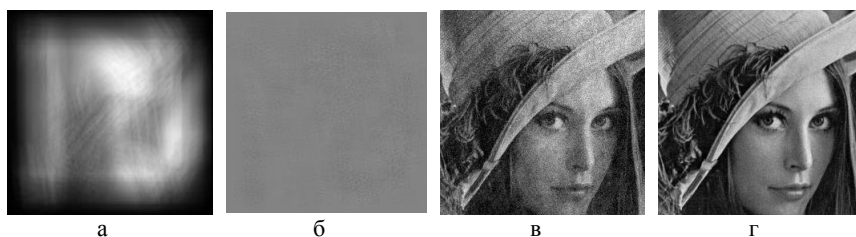


Рис. 2. Кодированные изображения: без АМ (а) и с их использованием (б). Фрагменты соответствующих декодированных изображений: без АМ (в), с АМ (г)

Результаты проведенных численных экспериментов демонстрируют, что визуальная скрытность при использовании амплитудных масок увеличивается более чем в 10 раз, отношение сигнал/шум увеличивается в среднем в 2 раза.

А.П. БОНДАРЕВА, И.Ю. ЭРЬКИН

Научный руководитель – В.В. КРАСНОВ, к.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ СЕРИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБОРА КОДИРУЮЩИХ КЛЮЧЕЙ В СХЕМЕ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ НА БАЗЕ ДВУХ ЖК ПВМС

Проведено оптическое кодирование и численное декодирование серии тестовых изображений с использованием набора различных кодирующих ключей в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух ЖК ПВМС. Проведен анализ полученных результатов.

Схема оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным освещением на базе двух ЖК ПВМС подробно описано в работе [1]. В качестве кодируемых изображений использовались тестовые (256-градационные) изображения размером 128×128 отсчетов, приведенные в таблице 1. В качестве кодирующих дифракционных оптических элементов (ДОЭ) использовались киноформы [2].

В качестве объектов кодирования использовалось 7 различных изображений размером 128×128 отсчетов с 256 градациями яркости (см. таблицу 1). Каждое изображение кодировалось с использованием 7 различных случайных ключей кодирования. Ключи имели 64×64 отсчетов, их нормированная средняя энергия составляла 0,005.

На рис. 1 представлен пример оптического кодирования изображения.

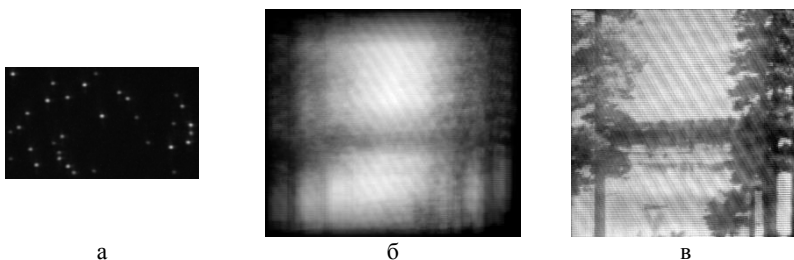


Рис. 1. Пример оптического кодирования изображения: ключ кодирования (а), кодированное с использованием этого ключа изображение (б), а также соответствующее ему численно декодированное изображение (в)

Декодирование осуществлялось численно с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [3]. Оценка качества декодированных изображений производилась путём расчёта нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) декодированных изображений от исходных. Значения НСКО декодированных изображений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Кодированные изображения и соответствующие им значения НСКО

			
0,154±0,007	0,212±0,005	0,234±0,012	0,271±0,008
			
0,155±0,015	0,231±0,012	0,145±0,007	

Результаты проведённых экспериментов демонстрируют успешное кодирование и декодирование серии тестовых изображений с использованием набора различных кодирующих ключей. НСКО декодированных изображений лежит в диапазоне 0,15÷0,27.

Список литературы

1. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Scheme of optical image encryption with digital information input and dynamic encryption key based on two LC SLMs // *Physics Procedia*. 2015. V.73. P.320-327.
2. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Optical encryption in spatially-incoherent light using two LC SLMs for both information input and encryption element imaging // *Proceedings of SPIE*. 2014. V.9249. P.924915.
3. Арсенин В.Я., Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.

С.А. БЕРДЫШЕВА

Научный руководитель – В.В. КРАСНОВ, к.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ВИДЕ QR-КОДОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ СВЕТЕ

Представлены результаты экспериментов по оптическому кодированию и численному декодированию цифровой информации представленной в виде QR-кодов. Кодирование QR-кодов осуществлялось посредством схемы оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением на базе двух ЖК ПВМС. Кодированные QR-коды успешно декодированы, частота появления ошибок составила $(8,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$.

В настоящее время все большую популярность приобретают QR-коды, представляющие собой матричные коды, содержащие алфавитные буквы, символы и цифры.

Установка кодирования построена на базе двух жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС), служащих для ввода цифровой информации (ПВМС1) и для отображения кодирующего дифракционного оптического элемента (ПВМС2), в качестве которого использовались киноформы. После прохождения монохроматического пространственно-некогерентного лазера через систему, состоящую из двух ЖК ПВМС и систему линз, на фотосенсоре камеры образуется изображение, представляющее собой свертку кодируемого QR-кода и импульсного отклика киноформа.

В качестве объектов кодирования использовалось 7 различных кодов QR-кодов размером 129×129 отсчетов. Каждый QR-код кодировался с использованием 7 различных случайных ключей кодирования. Ключи имели 64×64 отсчетов, их нормированная средняя энергия – 0,005.

Пример оптического кодирования и численного декодирования изображения QR-кода представлен на рис. 1.

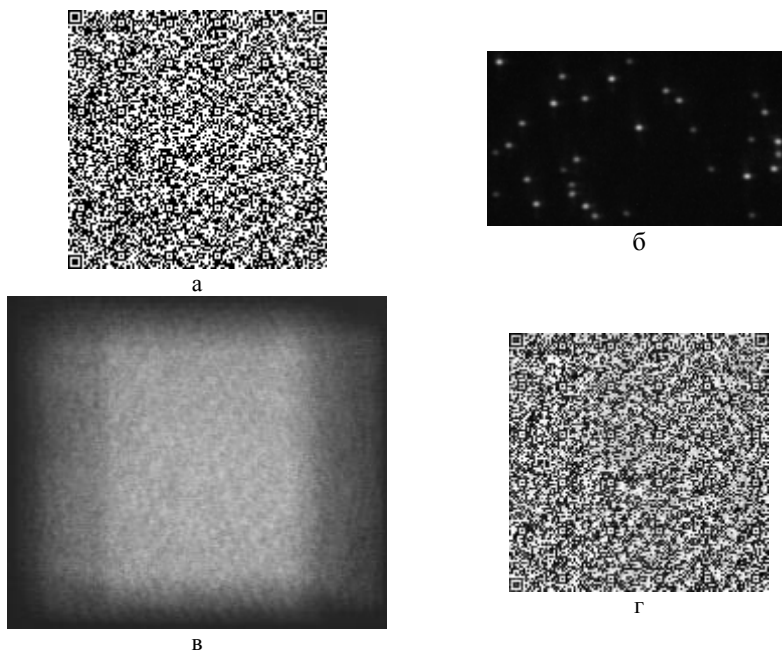


Рис. 1. Пример оптического кодирования изображения QR-кода: исходный QR-код (а), отображаемый на ПВМС1, кодируется функцией рассеяния точки кодирующего дифракционного оптического элемента (б), отображаемого ПВМС2, закодированное изображение (в) регистрируется камерой и затем численно декодируется (г)

Численное декодирование производилось с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [2]. После декодирования производилось сведение растров декодированного изображения с исходным корреляционным методом. Далее, производился подсчет ошибок. Полученное число ошибок для различных QR-кодов и ключей лежит в диапазоне $13 \div 16$, частота появления ошибок составляет $(8,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$.

Список литературы

1. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Scheme of optical image encryption with digital information input and dynamic encryption key based on two LC SLMs // *Physics Procedia*. 2015. V.73. P.320-327.
2. Арсенин В.Я., Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.

А.В. БЕЛАШОВ

Научный руководитель – Н.В. ПЕТРОВ, к.ф.-м.н.

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СЛУЧАЙНЫЕ И СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

В работе представлены результаты изучения влияния случайных и систематических ошибок, возникающих в ходе эксперимента, на качество восстановления трехмерного распределения показателя преломления. Исследована возможность улучшения качества восстановления при наличии экспериментальных погрешностей за счет увеличения количества зарегистрированных цифровых голограмм.

Методы цифровой голографической томографии, позволяющие восстанавливать трехмерные распределения показателя преломления исследуемого объекта, широко используются для решения задач неразрушающего контроля неорганических структур [1] и неинвазивного исследования биологических объектов [2]. Быстрое развитие этих методов, привело к разработке алгоритмов, позволяющих наблюдать динамику изменения показателя преломления в объекта с высоким пространственным разрешением в реальном времени.

Как правило, в рамках данного подхода вначале производится восстановление и развертка фазовых набегов волнового фронта, прошедшего через исследуемый объект под различными углами. Затем полученные распределения подаются в качестве входных данных в томографический алгоритм [3]. В результате обработки происходит восстановление данных о величине фазового набеге в каждой элементарной ячейке, которые затем могут быть переведены в значения показателя преломления.

В рамках данной работы было исследовано влияние случайных и систематических экспериментальных погрешностей на качество восстановления исходных данных. Для этого было проведено численное моделирование процесса прохождения волнового фронта через объекты с заданным распределением показателя преломления при различных конфигурациях оптической системы, а также процесс записи цифровых голограмм при различных соотношениях сигнал/шум. Затем проводилось восстановление полученных интерференционных картин, а также их последующая обработка с помощью томографического метода обратного распространения [3]. Для контроля качества работы данного алгоритма восстановленные

данные сопоставлялись с исходным распределением показателя преломления в моделированных объектах.

В результате было показано, что влияние случайных погрешностей на восстановленные данные может быть значительно уменьшено благодаря увеличению информационного наполнения, то есть за счет регистрации большего количества цифровых голограмм волнового фронта, проходящего через объект под различными углами. Однако появление систематических ошибок в ходе эксперимента может привести к существенным искажениям полученных данных. Подобные ошибки могут возникнуть при несовпадении проекций оси вращения, используемой при восстановлении, с осью вращения объекта или волнового фронта в ходе эксперимента, а также при недостаточно хорошей коллимации предметного пучка.

Список литературы

1. Lin Y.-C. and Cheng C.-J. Sectional imaging of spatially refractive index distribution using coaxial rotation digital holographic microtomography // J. Opt. 2014. V.16. P.065401.
2. Choi W., Fang-Yen C., Badizadegan K., Oh S., Lue N., Dasari R.R., Feld M.S. Tomographic phase microscopy // Nat. Methods. 2007. V.4. P.717–719.
3. Kak A.C. and Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. Philadelphia: PA, 2001.

Е.А. КУРБАТОВА

Научный руководитель – Н.Н. ЕВТИХИЕВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА СЖАТИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ И СИСТЕМ ТРЕХМЕРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Цифровая голография позволяет восстанавливать информацию о 3D-сценах, в том числе для медицинских, информационных и биологических задач, а также при регистрации системами видеонаблюдения. Для повышения скорости передачи информации об объектах и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для её хранения, необходим метод оперативного сжатия цифровых голограмм, дающий хорошее качество восстановления сцен. В работе предлагается разработка метода сжатия голограмм, имеющего быстроедействие, сопоставимое со скалярными методами, а качество восстановленных изображений, сопоставимое с векторными.

В настоящее время цифровая голография является популярным инструментом для исследований и практических применений в различных областях науки и техники: интерферометрии [1], микроскопии [2-3], восстановлении статических и динамических сцен [4-5], обработке информации [6] и др. В отличие от фотографии, голография позволяет регистрировать информацию не только о «плоских» объектах, но и об объёмных сценах [6]. Развитие характеристик цифровых камер привело к тому, что размеры файлов голограмм составляют десятки мегабайт. Для передачи голографического видео с частотой фильмов (24 Гц) необходимо иметь канал с пропускной способностью 2-4 Гбит/с, что существенно больше пропускной способности, используемой в стандартных каналах связи в настоящее время. Аналогично для хранения такого видео необходимы большие объёмы носителей информации, так как 10 мин виде будет иметь размер более 1 терабайта.

Для повышения скорости передачи голограмм и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для их хранения, можно проводить сжатие голограмм. Данная задача актуальна для: 1) систем 3D-наблюдения (охранные системы [4]; регистрация объектов, в том числе океанической флоры и фауны [5]; восстановление объёмных сцен удаленно, в том числе регистрируемых в агрессивных средах); 2) медицинских применений (томография, наблюдение за состоянием органов человека) [3];

3) интерферометрии [1]; 4) микроскопии (отслеживание микрообъектов, эритроцитов, планктона; анализ клеток [2]); 5) метрологии [6].

В настоящее время предлагаются следующие методы сжатия голограмм: основанные на стандартах изображений и видео (JPEG, MPEG-4 и др.), скалярные (неравномерное логарифмическое сжатие и др.) и векторные (основанные на обучении системы, например, метод динамических ядер) [8]. Первая группа основана на статистических параметрах изображений и особенностях визуального восприятия человеком. Однако в случае голограмм эти методы значительно менее пригодны, так как обычные снимки направлены на регистрацию амплитуды волны, а голограммы направлены в большей степени на сохранение фазы. Помимо этого, при сжатии голограмм наиболее важным является качество именно восстановленных изображений, а не визуальное восприятие сжатой голограммы. Можно использовать сжатие без потерь (например, алгоритм LZW), однако файлы голограмм уменьшаются обычно лишь до 2 раз [9]. Скалярные методы сжатия голограмм имеют наиболее высокое быстродействие, но низкое качество восстановления, а векторные – наиболее низкое быстродействие и высокое качество восстановленных изображений.

В работе предлагается разработка нового комбинированного метода сжатия цифровых голограмм, имеющего быстродействие, сопоставимое со скалярными методами, а качество восстановленных изображений, сопоставимое с векторными. При этом коэффициент сжатия файлов голограмм будет не менее 8. Так как наиболее критичным является скорость сжатия, то за основу метода принят подход, характерный для скалярных методов. Оптимизация параметров метода выполняется на основе анализа векторных методов и их применения к группам голограмм.

Список литературы

1. Monroy-Ramirez F., et. al. // Optik. 2014. Vol.125. P.2113-2116.
2. Molder A., et. al. Non-invasive, label-free cell counting and quantitative analysis of adherent cells using digital holography // Journal of Microscopy, 2008. Vol.232. №2. P.240–247.
3. Bianco V., et. al. Clear microfluidics imaging through flowing blood by digital holography // IEEE Journal of. Selected Topics Quantum Electron. 2014. Vol.20, Is.3. P.6636048.
4. Locatelli M., Pugliese E., Paturzo M., et al. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography // Optics Express. 2013. Vol.21. Is.5. P.5379-5390.
5. Watson J., Burns N.M. Subsea Optics and Imaging. Elsevier Ltd. 2013. P.294-326.
6. Schnars U., et al. Digital Holography and Wavefront Sensing. Springer, Berlin, 2015.
7. Naydenova I. Advanced Holography - Metrology and Imaging. InTech, 2011.
8. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Methods of Compression of Digital Holograms // Physics Procedia. 2015. V.73. P.328–332.
9. Bruylants T., Blinder D., Ottevaere H., Munteanu A., Schelkens P. Microscopic off-axis holographic image compression with JPEG 2000 // Proc. SPIE. 2014. V.9138. P.91380F.

М.Н. КУЛАКОВ, Л.А. ПОРШНЕВА

Научный руководитель – П.А. ЧЕРЁМХИН, к.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАСЧЕТ КИНОФОРМОВ ОБЪЕМНЫХ СЦЕН МЕТОДОМ «ПИНГ-ПОНГ»

Киноформы – фазовые дифракционные оптические элементы, позволяющие восстанавливать информацию об объектной волне путем их освещения плоской или сферической волнами. Для синтеза киноформов объемных сцен можно использовать методы «пинг-понг». В работе предлагается реализация и апробация различных модификаций метода для расчета киноформов.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются в задачах информационной и дифракционной оптики, например, в качестве:

- корректоров волновых фронтов,
- оптических коммутаторов,
- преобразователей в системах обработки изображений,
- фокусаторов и др.

К числу наиболее распространённых ДОЭ относятся киноформы. Киноформ [1-3] несёт информацию только о фазовой составляющей объектной волны и позволяет восстанавливать её при освещении плоской или сферической волной. К числу наиболее популярных методов оптического восстановления информации с киноформов относится их вывод на пространственно-временные модуляторы света [4].

Наиболее популярными методами синтеза киноформов являются алгоритмы Герцберга-Сэкстона [2] и Фьенапа [3], а также их модификации: например, адаптивно-аддитивный или адаптивно-мультипликативный [1]. Эти методы направлены на синтез фазовых ДОЭ для восстановления информации о «плоских» объектах [5].

Для синтеза ДОЭ объемных сцен, позволяющих восстанавливать «плоские» сфокусированные изображения в различных сечениях этих объемных сцен, можно использовать методы, подобные алгоритму «пинг-понг» [6-8]. Классическая схема метода приведена на рис. 1. Расчет распространения излучения и применение амплитудных и фазовых ограничений производятся между сечениями объемной сцены, соответствующим сфокусированным изображениям объектов (плоскости А и Б). А киноформ создается лишь расчетом распространения излучения до плоскости киноформа в качестве финального шага алгоритма.



Рис. 1. Схема синтеза киноформов объемных сцен методом «пинг-понг»

В настоящее время предложены различные модификации метода. К ним относятся, например, итеративный алгоритм многих плоскостей [7], аддитивный итеративный алгоритм [8] и др. Подобные модификации метода позволяют синтезировать киноформы, например, для восстановления сфокусированных изображений объектов в 3 различных плоскостях. Помимо этого, для повышения качества восстановления они стали использовать расчет распространения излучения в различных направлениях, а не только между объектными плоскостями.

В работе предлагается реализация модификации метода "пинг-понг" для расчета киноформов объемных сцен, в том числе учитывающие существующие методы.

Список литературы

1. Головашкин Д., Досколович Л., Казанский Н., Котляр В., Павельев В., Скиданов Р., Сойфер В., Хонина С. Дифракционная компьютерная оптика. ФИЗМАТЛИТ, 2007.
2. Fienup J.R. Phase Retrieval Algorithms: a Personal Tour // Appl.Opt. 2013. V.52, P.45-56.
3. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik. 1972. V.75, No. 2. P. 237–246.
4. Toyoda H., Inoue T., Mukozaka N., Hara T., Wu M.H. Advances in Application of Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator (LCOS-SLM) // SID Symposium Digest of Technical Papers, San Diego, CA, 2014. V.45, Issue 1. P.559–562.
5. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Porshneva L.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Comparison of kinoform synthesis methods for image reconstruction in Fourier plane // Proceedings of SPIE. 2014. V.9131. P.913124.
6. Dorsch R.G., Lohmann A.W., Sinzinger S. Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display // Applied Optics. 1994. V.33, Issue 5. P.869-875.
7. Ying C.-f., Pang H., Fan C.-j., Zhou W. Chao-fu Ying. New method for the design of a phase-only computer hologram for multiplane reconstruction // Opt. Eng. 2011. V.5. P.055802.
8. Xiaoyu J.A., Chuang P., Xi W., Yantao Z. Novel Iterative Computation Algorithm for Kinoform of 3D Object // Proceedings of SPIE. 2012. V.8556. P.85561H.

Л.А. ПОРШНЕВА, Е.А. КУРБАТОВА

Научный руководитель – П.А. ЧЕРЁМХИН, к.ф.-м.н.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПИСИ И ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Для задачи оценки дифракционной эффективности цифровых голограмм и качества восстановления изображений с них разработана методика моделирования записи голограмм и оптического восстановления изображений. Методика учитывает характеристики используемого объекта; разрешение, шумовые и радиометрические параметры регистрирующей цифровой камеры; а также разрешение, количество градаций и тип пространственно-временного модулятора света, используемого для вывода цифровых голограмм.

Качество восстановления изображений и дифракционная эффективность (ДЭ) являются важнейшими характеристиками в классической (аналоговой) голографии [1]. Вопросы оценки ДЭ и получаемого качества восстановленных изображений с аналоговых голограмм широко исследовались и подробно описаны для различных регистрирующих сред. В цифровой голографии [2] в качестве «регистрирующей среды» выступает матричный фоторегистратор камеры. При численном восстановлении имеет значение только качество полученных изображений, а ДЭ имеет лишь умозрительный смысл. Однако в случае оптического восстановления ДЭ получает практическое наполнение. Наиболее распространённым методом оптического восстановления является вывод голограмм на пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) [2-7]. Оптическое восстановление изображений с голограмм используется как инструмент исследований и практических применений для удалённого отображения статических [2-4] и динамических [5-6] «плоских» и объёмных сцен, в том числе зарегистрированных вне видимого диапазона [6], для проекционных систем [4], стереоскопического зрения и др.

Задача оценки ДЭ и качества восстановленных изображений может быть решена путем численного моделирования процесса регистрации цифровых голограмм и оптического восстановления изображений с них с помощью ПВМС [7]. Используемая схема численных экспериментов по моделированию записи цифровых голограмм и оптическому восстановлению изображений с них состоит из 4 этапов:

- создание модельного объекта,
- моделирование записи голограммы (моделирование распространения волны от плоскости объекта до плоскости голограммы, синтез голограммы),
- квантование голограммы и моделирование её вывода на ПВМС,
- моделирование оптического восстановления изображения (моделирование распространения волны от плоскости ПВМС до плоскости сфокусированного восстановленного изображения).

Методика учитывает следующие величины:

- характеристики используемого объекта;
- разрешение, шумовые и радиометрические параметры регистрирующей цифровой камеры;
- разрешение, количество градаций и тип ПВМС, используемого для вывода цифровых голограмм.

Использование разработанной методики численного моделирования даёт возможность выбирать условия записи цифровых голограмм, а также тип ПВМС, исходя из характера решаемой задачи, например, для регистрации и отображения объёмных сцен в режиме реального времени.

Список литературы

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., Мир, 1973.
2. Schnars U., Falldorf C., Watson J., Juptner W. Digital Holography and Wavefront Sensing. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2015.
3. Zeng Z., Zheng H., Lu X., Gao H., Yu Y. Dynamic holographic three-dimensional projection based on liquid crystal spatial light modulator and cylindrical fog screen // Optical Review. 2015. V.22, Issue 5. P.853-861.
4. Gopinathan U., Monaghan D., Hennelly B., McElhinney C.P., Kelly D.P., McDonald J.B., Naughton T.J., Sheridan J.T. A Projection System for Real World Three-Dimensional Objects Using Spatial Light Modulators // Journal of Display Technology. 2008. V.4, Issue 2. P.254-261.
5. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Porshneva L.A., Rodin V.G. Starikov S.N. Improvement of quality of optical reconstruction of digital Fourier holograms displayed on phase-only SLM by its digital preprocessing // Proceedings of SPIE. 2014. V.9249. P.92491B.
6. Ferraro P., Finizio A., Gertrude A., Locatelli M., Meucci R., Miccio L., Paturzo M., Pelagotti A., Poggi P. Optical reconstruction of digital holograms recorded at 10,6 μm : route for 3D imaging at long infrared wavelengths // Optics Letters. 2010. V.35, Issue 12. P.2112-2114.
7. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Курбатова Е.А. Оценка дифракционной эффективности и качества изображений при оптическом восстановлении цифровых голограмм Френеля // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т.57, № 8-9. С.711-727.

Д.Ю. МОЛОДЦОВ

Научный руководитель – Н.Н. ЕВТИХИЕВ, д.ф.-м.н., профессор
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ DMD-МОДУЛЯТОРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ НА ЕГО ОСНОВЕ УСТРОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪ- ЕКТОВ ПО ФОРМЕ И СПЕКТРУ ИЗЛУЧЕНИЯ

Экспериментально оценивалось качество восстанавливаемых импульсных откликов голограмм, выводимых на три DMD-модулятора различных моделей. По разработанной методике оценивалась интегральная характеристика оптического качества данных модуляторов – размер условно плоского участка поверхности матрицы. Проанализированы результаты восстановления голограмм.

Технология DMD (Digital Micromirror Device) в настоящее время широко применяется в различных областях науки и техники: DLP-проекторы, голографические принтеры, 3D-дисплеи и др.

В проведённых исследованиях рассмотрена возможность использования DMD в дисперсионных корреляторах – устройствах для оптического распознавания по пространственным и спектральным характеристикам объекта, использующего в качестве фильтров голограммы Фурье. Чтобы DMD модулятор мог быть использован в качестве устройства вывода голограмм, он должен удовлетворять ряду дополнительных требований, так как возможен негативный эффект – наличие нежелательной фазовой модуляции, возникающей из-за технологических погрешностей в конструкции модулятора.

В документации к DMD-модулятору можно найти следующие характеристики, относящиеся к технологическим погрешностям, влияющих на оптическое качество: погрешность угла наклона микрозеркал, погрешность ориентации оси наклона микрозеркал, плоскостность выходного окна модулятора. Для используемых в данной работе DMD значения этих параметров составляли соответственно $\pm 1^\circ$, $\pm 1^\circ$ и 4 интерференционные полосы.

Для многих областей применения такого типа модулятора важна лишь амплитудная модуляция излучения, и указанные погрешности не оказывают существенного влияния. Однако при использовании DMD в качестве устройства вывода голограмм, происходит ощутимое ухудшение восстанавливаемого импульсного отклика. В оптической схеме для удобства

подведения освещения к модулятору использовался заводской блок, включающий расщепитель пучка и конденсорную линзу. Далее данный блок был исключен из схемы, что не привело к улучшению качества восстанавливаемого изображения. Таким образом, было экспериментально показано, что имеющиеся технологические погрешности DMD заметно ограничивают возможности его применения для вывода голограмм.

В данной работе экспериментально оценивалось качество восстанавливаемых импульсных откликов голограмм, выводимых на три различных DMD-модулятора от Texas Instruments. Все модуляторы относятся к семейству 0.7 XGA 12° DDR, модели s1076-7071b и два s1076-7072 (используются в DLP Discovery 4100 Development Kit). В качестве характеристики оптического качества DMD-модулятора было предложено использовать размер условно плоского участка поверхности матрицы. Для её оценки достаточно определить максимальный размер (в отсчётах) голограммы, импульсный отклик которой содержит решётку с периодом в 2 пикселя и которая будет разрешима в восстановленном изображении.

С помощью специально написанной программы голограмма анимировалась – перемещалась по поверхности матрицы, при этом на каждом кадре анимации также происходила регистрация восстановленного изображения на камеру. Это позволяет проверить качество отдельно взятого участка модулятора при выводе на него голограммы небольшого размера. Результаты заметно отличаются даже для DMD-чипов одной модели: качество одного из модуляторов s1076-7072 оказалось существенно лучше (размер условно плоского участка в среднем равен 3 мм, у двух других – 1.5 мм).

Таким образом было установлено, что по документации к модуляторам невозможно выяснить, удовлетворяет ли их оптическое качество для использования в качестве устройства вывода голограмм, и необходимо анализировать качество индивидуального экземпляра. Разработанная и примененная методика оценки позволяет быстро оценить размеры голограмм, которые можно использовать для данного модулятора, получая хорошее качество восстановленного изображения, а также определить области на матрице с повышенной искривленностью поверхности.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ СТАТЕЙ

– А –

Агафонов С.А., 19
Акобян Д.А., 52
Алейников А.В., 245
Алхимова М.А., 195
Алюшин М.В., 229
Аляев И.В., 232
Амбуркин К.М., 127
Антонова А.М., 247
Антонюк А.В., 125
Аткин Э.В., 111, 113, 115, 152, 156
Афонасов А.А., 229
Ашиккалиева М.Х., 107

– Б –

Байков А.Ю., 190
Байкова О.А., 190
Баранов В.Г., 28, 73, 221
Баранова М.А., 44
Белашов А.В., 280
Белогорлов А.А., 86
Бердышева С.А., 278
Беспалов В.Г., 258
Бирюкова К.С., 97
Богачев И.А., 238
Богданова Е.В., 32
Богданович Р.Б., 26
Бойко А.В., 44, 48
Бондарева А.П., 276
Боровков П.Ю., 225
Бортникова С.А., 86
Бубликова И.А., 42, 50, 225
Быков А.О., 108
Быркин В.А., 83

– В –

Валиков Р.А., 67
Веселов Д.С., 181, 186
Виноградов С.М., 111, 113, 115
Власов А.О., 179, 188

Вовк Т.А., 271
Волков Н.В., 67, 68
Волков Ю.Н., 234
Востриков А.В., 245

– Г –

Гайбура А.В., 186
Галанова М.Н., 50
Гамцемлидзе И.Д., 34
Гарафутдинов М.И., 117
Герасимов Ю.М., 123
Герасимчук А.В., 163, 169
Городков С.С., 22, 32
Грехов А.М., 84
Григорьева И.Г., 201
Гудошников С.А., 99
Гуркин В.Н., 89
Гусева Л.Ю., 238

– Д –

Давыдов Г.Г., 150
Дементьев В.В., 175
Демидова М.Е., 140
Денисенко А.О., 34
Денисова М.О., 34
Дергунова Е.А., 231
Дмитренко В.В., 213
Доброхотов П.Л., 71
Довгополая Е.А., 183, 211, 243
Довженко Д.С., 263, 265
Доможаков Д.А., 119, 177
Дятлов Н.С., 138

– Е –

Евтихийев Н.Н., 274, 282, 288
Егоров А.М., 217
Елманов Г.Н., 99
Епифанцев К.А., 138
Есеньков К.А., 167
Ефимов В.С., 197

– Ж –

Жидков Н.М., 131
Жихарев Г.Ю., 163, 167

– З –

Зебреев Г.И., 117, 154, 173
Земцов К.С., 173
Зубков И.О., 58

– И –

Иванов И.А., 223
Иванова А.В., 160
Иванычева А.Н., 53, 56
Имаметдинов Э.Ф., 171, 179
Исаенкова М.Г., 69, 71
Исламгалиев А.А., 19

– К –

Йе Науне, 66

– К –

Калашников Н.П., 38
Калмыкова Д.Е., 42
Каракозов А.Б., 134, 136
Карасева М.Д., 87
Карпихин А.Е., 77
Кашурников В.А., 203
Киреев В.П., 44, 48
Кладко С.Г., 192
Кобзарь М.С., 163, 169
Кобыляцкий А.В., 123
Ковалева О.Н., 236
Коваленко В.Г., 44, 48
Козлов И.В., 99
Коков З.А., 108
Колобова Я.С., 209, 229
Колосова А.С., 150
Кондратенко С.В., 119, 177
Королев П.С., 223
Коротеев М.Е., 140
Космынцева А.В., 93

Костиков В.О., 234
Костюченко Д.С., 133
Краевченко П.Д., 53, 56, 58, 60
Краснов В.В., 276, 278
Краснюк А.А., 171
Крюков И.С., 64
Кузнецов А.Н., 22
Кузнецова Ю.О., 260
Кулаков М.Н., 284
Куликов И.С., 48
Куприянов А.С., 40
Курбатова Е.А., 282, 286
Курилкин М.О., 231
Курчатова И.М., 36, 79, 81, 87

– Л –

Лагунцов Н.И., 36, 79, 81, 89, 215
Лебедев В.В., 97, 102
Лебедев М.А., 221
Левин К.Э., 129
Листов А.С., 24
Литинова Т.А., 75
Лихоманова П.А., 84
Лоскутов И.О., 134, 142
Лощенов В.Б., 260, 261

– М –

Маклыгина Ю.С., 261
Максимкин А.И., 64
Мартынов И.Л., 263, 265
Марфин В.А., 144
Марьина Е.В., 171, 188
Масленников В.В., 62, 183, 184, 211, 243
Матятина А.Н., 38
Мацак И.С., 255, 256
Маякова О.Ю., 245
Мельникова Ю.А., 109
Мещеряков В.В., 211
Митрофанова А.С., 83
Михальчик В.В., 73
Можаяев И.А., 133
Молодцов Д.Ю., 288
Мороз А.Н., 203
Морозова О.Л., 109

Морохов П.В., 207
Москаленко К.А., 136

– Н –

Наговицына О.А., 30
Небаевский В.А., 253
Некрасов П.В., 133, 134, 136,
142, 144
Никитаев В.Г., 107
Никитин С.Н., 28
Николаева Д.В., 55
Николаева Т.Ю., 271, 272
Никонов С.П., 34
Новиков А.А., 146
Новиков П.Г., 217
Новосельцев А.В., 53

– О –

Облов К.Ю., 158
Овсиенко А.С., 19
Овчинников Д.С., 255
Омар К.М., 136
Орлов В.В., 154
Осипов Е.В., 263, 265
Осипова Т.А., 91

– П –

Паньковский Б.Е., 251
Перлович Ю.А., 69
Петренко Д.В., 213
Петров В.И., 48, 205
Петров Н.В., 271, 272, 280
Петрова Е.К., 267, 269
Печенкин А.А., 146
Пикуз С.А., 195
Пимшин Ю.И., 236
Писарев А.А., 197
Полесский С.Н., 217, 219, 245,
249, 251
Поляков Е.В., 107
Попов В.В., 205
Поршнева Л.А., 284, 286
Посакалов А.Г., 197
Прошкина Е.Я., 24

Пьянков С.С., 269

– Р –

Разуваев А.Е., 256
Разумный В.В., 117
Раннев Н.Ю., 119, 177
Резаев Р.О., 104
Решетов В.Н., 209
Римашевская Е.Д., 227
Рогов П.Ю., 258

– С –

Савёлов С.А., 195, 199, 201
Сагдиев И. Г., 156
Садыхов Э.Г., 95
Саломасов В.А., 215
Сальдилов И.С., 240
Самотаев Н.Н., 158, 160, 162
Севрюков О.Н., 207
Селяев Н.А., 232
Семененко А.Н., 64
Семенов И.Б., 55
Семенова Н.А., 95
Сергеев Д.К., 123
Сергиевский В.В., 30
Сидоренко А.А., 207
Скворцова А.А., 102
Скоробогатов П.К., 138, 247
Скороходов И.С., 101
Скуридин И.Е., 81
Слободчук В.И., 52
Смирницкий Н.С., 181
Смирнов А.Д., 241
Соловьев С.А., 162
Сорокоумов Г.С., 148
Стальцов М.С., 238
Старилов Р.С., 253, 267, 269
Стенин В.Я., 121, 125, 129
Стрельцов В.Н., 121
Стриханов М.Н., 190
Сударев А.А., 184

– Т –

Талалай А.С., 60
Таранов Н.С., 75
Тарасов Б.А., 28
Терновых М.Ю., 19, 24
Титова М.И., 127
Тихомиров Г.В., 19, 24, 26, 240, 241
Тихомирова А.Н., 101
Тихонов С.Н., 36
Тишин А.А., 79
Тронин И.В., 84
Тугаенко В.Ю., 255, 256
Тутнов И.А., 64

– У –

Узиков В.А., 91
Уланова А.В., 247
Усачев Н.А., 131

– Ф –

Фаррахова Д.С., 260
Федоренко Д.Н., 53, 56
Фелицын В.А., 154
Филиппов В.П., 215
Филиппов Е.Д., 199
Флоренцев В.В., 104
Фомин Д.К., 93
Фролов М.А., 64

– Х –

Хунов Т.Х., 249

– Ц –

Цаплин М.А., 62
Царенко А.В., 219

– Ч –

Чебан Н.О., 184
Чеканов С.В., 69
Чепайкин И.А., 46

Черёмхин П.А., 284, 286
Чернов И.И., 238
Чиж В.А., 227
Чистяков А.А., 263, 265
Чумаков А.А., 53, 56
Чумаков А.И., 146, 148

– Ш –

Шагурин И.И., 163, 165, 167, 169, 175
Шамрай В.Ф., 77
Шарилова А.Р., 150
Шарова А.С., 261
Швецов-Шиловский И.И., 142
Шифрина А.В., 274
Школьников Э.Я., 192
Шорников Д.П., 28, 221
Шумкин О.В., 152

– Щ –

Щагин А.В., 66
Щербаков А.С., 205
Щербин С.Л., 108
Щигорев Л.А., 165

– Э –

Эрькин И.Ю., 276

– Ю –

Юсупов А.Н., 40

– Я –

Яковлев Д.Ю., 46
Яковлев И.П., 219
Яшин А.С., 68

