

СБОРНИК РАБОТ АСПИРАНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО,
победителей конкурса грантов
Правительства Санкт-Петербурга

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2017 г.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 235 с.

Сборник содержит работы аспирантов Университета ИТМО, удостоенных премии Правительства Санкт-Петербурга, победителей конкурса грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Научные отчеты по результатам выполнения грантов издаются с целью демонстрации достижений аспирантов университета, стимулирования их участия в научных исследованиях, повышения качества подготовки специалистов с высшим образованием и формирования резерва для кадров высшей квалификации.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017

Авторы, 2017



На церемонии награждения аспирантов Университета ИТМО – победителей конкурса грантов. В центре ректор В.Н. Васильев

В настоящее время Университет ИТМО располагает научными кадрами и развитой инновационной инфраструктурой, что позволяет проводить научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий в Российской Федерации. Аспиранты университета принимают непосредственное участие в решении многих сложных задач как прикладных, так и фундаментальных.

Важную роль в поддержке научных исследований молодежи играет ежегодный конкурс грантов для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга. Конкурс, в котором на протяжении шестнадцати лет участвуют аспиранты Университета ИТМО, проводится Комитетом по науке и высшей школе при Правительстве Санкт-Петербурга. Наш университет занимает второе место среди вузов города по количеству поданных и выигранных заявок. В 2016 году аспирантами Университета ИТМО было подано 334 заявки, из них выиграно 69.

Совмещение фундаментальных и прикладных исследований и разработок с образовательным процессом служит основой для повышения качества подготовки молодых ученых и специалистов высшей квалификации. В настоящий сборник вошли работы победителей конкурса грантов 2016 года. Аспиранты демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, осуществляемых в университете под руководством ведущих ученых вуза.

Проректор д. т. н., проф. В.О. Никифоров



Акопян Мисак Геворкович
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра мехатроники
E-mail: brain-net@mail.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МОДЕЛЯХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

М.Г. Акопян

Научный руководитель – доцент С.С. Резников

Цель исследования – разработка метода математического моделирования геометрической формы зубчатых колес, пригодного для дальнейшего использования в компьютерном моделировании и в испытаниях зубчатых колес на трение, износ и ресурс работы. Достижение поставленной цели связано с решением следующих задач:

- разработка метода математического моделирования зубчатых колес, учитывающего непрерывное изменение их формы вследствие трения;
- оценка пригодности разработанного метода для применения в компьютерном моделировании;
- разработка рекомендаций для методики реализации компьютерной модели.

Описание модели

Моделирование цилиндрической прямозубой передачи во многих аспектах основывается на положениях упруго-статической модели. Были приняты дополнительные допущения:

- зубья каждого колеса изнашиваются одинаково;
- условия работы передачи считаются неизменными;
- к выходному валу приложен постоянный момент сопротивления;
- шестерня вращается с постоянной угловой скоростью;
- частота вращения шестерни достаточно мала, поэтому динамическими нагрузками, обусловленными неравномерностью вращения колеса можно пренебречь;
- износ считается достаточно малым, что позволяет игнорировать изменения упругих свойств зубьев;
- трение в зацеплении не учитывается.

В основе эволюционного подхода к моделированию лежит деление процесса изнашивания на ряд шагов. Изменение наработки Δn на каждом шаге выбирается настолько малым, что в его пределах условия изнашивания можно считать постоянными. Отсюда следует, что приращение износа ΔH_i можно считать постоянным и в любой i -ой точке профиля с достаточной степенью точности выразить уравнением:

$$\Delta H_i = I_i \cdot \Delta n. \quad (1)$$

Износ эквивалентен перемещению точки по нормали к поверхности трения (рис. 1), и при известных координатах достаточно большого (m) числа точек, задающих профиль зуба в начале шага изнашивания $\{x_i, y_i\}_{i=1}^{i=m}$, их координаты $\{x_i^h, y_i^h\}_{i=1}^{i=m}$ в конце этого шага равны [1]:

$$\begin{aligned}x_i^h &= x_i + I_i \cdot e_{ix} \cdot \Delta n; \\y_i^h &= y_i + I_i \cdot e_{iy} \cdot \Delta n,\end{aligned}\quad (2)$$

где e_{ix} , e_{iy} – проекции орта нормали на оси координат, I_i – интенсивность изнашивания.

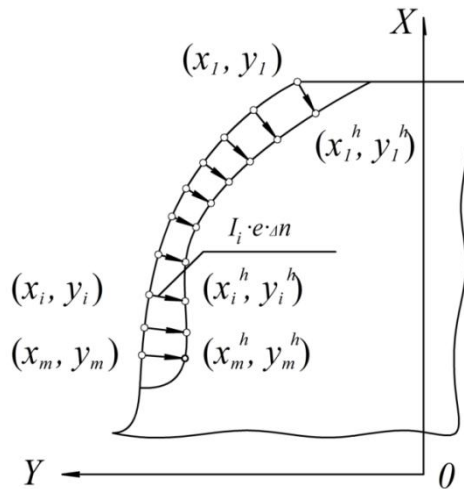


Рис. 1. Математическая модель процесса трения

Координаты точек $\{x_i^h, y_i^h\}_{i=1}^{i=m}$ определяют новую форму профилей зубьев. Дальнейшее моделирование процесса в каждой из этих точек требует поиска новых значений ортов нормалей и аргументов функции интенсивности изнашивания, то есть скорости, нагрузки и радиусов кривизны общей точки по профилям зубьев зубчатого зацепления. Это осуществляется при решении обратной задачи теории зацепления. Отсюда следует, что в основе всех эволюционных моделей процесса изнашивания зубчатого зацепления лежит алгоритм решения обратной задачи при точечном задании профилей.

Классическая постановка обратной задачи основывается на аналитическом задании профилей зубьев в виде функций или систем уравнений, описывающих инструмент и станочное зацепление [2]. Следовательно, первый этап решения этой задачи – переход от координатного к аналитическому описанию профилей изнашивающихся зубьев.

Для удобства и упрощения моделирования задается шаг износа ΔH , равный приращению износа в точке с максимальной интенсивностью изнашивания I_m .

Методика решения задачи

Решение задачи на каждом шаге изнашивания включает несколько этапов.

1. Переход от точного к аналитическому заданию профилей.
2. Решение обратной задачи в окрестности каждой точки профилей, определение ортов нормалей и геометро-кинематических показателей.
3. Определение нагрузки в контактных точках для зон однопарного зацепления и упругого пересопряжения зубьев.
4. Определение интенсивностей изнашивания J_i и шага наработки Δn .
5. Расчет координат точек изношенных профилей.

Профили исходного зацепления задаются наборами попарно сопряженных точек: i -я точка профиля зуба шестерни в процессе передачи движения контактирует с i -ой точкой профиля зуба колеса. За шаг изнашивания каждая точка перемещается по нормали к соответствующему профилю на величину износа ΔH_i , не превосходящую заданный шаг износа ΔH . Контактующие между собой точки профилей после шага износа перестают иметь общую точку контакта, они становятся несопряженными (квасисопряженными). При решении обратной задачи в окрестности каждой пары квазисопряженных точек отыскивается

пара сопряженных. Их координаты в конце шага изнашивания вновь становятся координатами квазисопряженных точек.

Используемые системы координат

При исследовании плоских зацеплений будем применять следующие системы координат: подвижные $S_1(x_1, y_1)$ и $S_2(x_2, y_2)$, жестко связанные с шестерней и колесом, и неподвижную систему координат $S(x, y)$ (рис. 2). Оси o_1, x_1 и o_2, x_2 подвижных систем являются осями симметрии зубьев исходной передачи. Отсчет углов поворота шестерни (a_1) и колеса (a_2) производится по направлению стрелок.

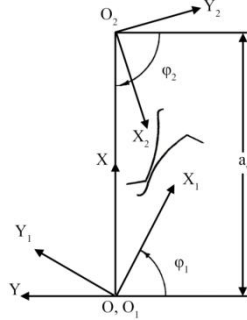


Рис. 2. Применяемые системы координат

Для упрощения переходов от одной системы координат к другой используются однородные координаты [2]. Матрицы перехода имеют вид:

$$M_{01} = \begin{vmatrix} \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 \\ -\cos\varphi_1 & \sin\varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (3)$$

$$M_{02} = \begin{vmatrix} -\sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 \\ -\cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (4)$$

$$M_{21} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & -\sin(\varphi_1 + \varphi_2) & a_w \sin(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & -a_w \cos(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (5)$$

$$M_{12} = \begin{vmatrix} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & a_w \sin(\varphi_1) \\ -\sin(\varphi_1 + \varphi_2) & \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & a_w \cos(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Радиус-вектор точки \bar{r}_i и свободный вектор \bar{e}_i будем отождествлять с матрицами столбцами:

$$\bar{r}_i = \begin{vmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{vmatrix}; \quad \bar{e}_i = \begin{vmatrix} e_{ix} \\ e_{iy} \\ 1 \end{vmatrix}, \quad (7)$$

где x_i, y_i – координаты точки в системе S_i , e_{ix}, e_{iy} – проекции орта нормали.

Введем дополнительные подвижные системы координат S_{1*} и S_{2*} с осями, параллельными системам S_1 и S_2 , (рис. 3). Это уменьшает погрешность вычисления величин изнашивания профилей на одном шаге. Системы S_1 и S_2 применяются при решении обратной задачи. Матрица перехода от систем S_{i*} к S_i имеет вид:

$$M_{ii*} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & x_{i0} \\ 0 & 1 & y_{i0} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

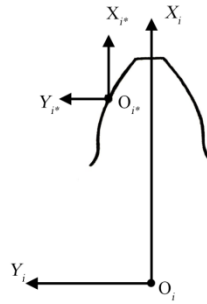


Рис. 3. Дополнительные системы координат

Применение модели в компьютерном моделировании

Предложенная математическая модель с высокой степенью точности описывает взаимодействие зубчатых колес в зубчатой паре и может быть использована при компьютерном моделировании. Современные ЭВМ способны в кратчайшие сроки выполнить по ней расчеты и отобразить результаты, в том числе и в иллюстративной форме.

Применение предложенной модели в расчетах на ЭВМ позволит значительно сократить временные и материальные затраты на проведение натурных испытаний. В производственном цикле, как правило, эти процессы занимают значительный временной интервал. Многочисленные этапы изготовления образцов для испытаний с исправленными характеристиками по результатам прошлых этапов также приводят к значительным затратам. С точки зрения инновационного подхода все этапы натурных испытаний должны быть заменены компьютерными, за исключением проверки окончательных параметров и характеристик полученных деталей.

Таким образом, образцы для испытаний будут изготавливаться один раз только для окончательной проверки. Благодаря введению в расчеты параметров износа приведенная математическая модель способна заменить собой несколько циклов испытаний. Дальнейшим ее развитием будет реализация не просто в современных пакетах программного обеспечения, но и возможность визуализации полученных данных.

Рекомендации по реализации компьютерной модели

Реализация математической модели средствами современных ЭВМ может быть осуществлена несколькими способами, в зависимости от чего будут варьироваться сложность реализации и качественно-количественные параметры получаемых возможностей.

Одним из наиболее простых способов внедрения математической модели в программное обеспечение для ЭВМ является использование современных программных пакетов из класса систем компьютерной алгебры, которые позволяют использовать математические формулы без видоизменений. Такие программы предназначены для выполнения расчетов по заданным исходным параметрам, с использованием соответствующих формул. Преимуществами этого метода являются простота реализации и низкие требования к графической подсистеме ЭВМ. К недостаткам можно отнести отсутствие визуальной составляющей (трехмерной модели), то есть все параметры выводятся в цифровом виде.

Более наглядный метод связан с использованием систем автоматизации проектирования. Внедрение математической модели в такие программные пакеты позволит не только получать результаты расчетов в виде цифр, но и автоматически «перерисовывать» исходные трехмерные модели испытуемых зубчатых колес. Недостатки метода заключаются в необходимости сотрудничества с разработчиками систем автоматизации производства, что зачастую требует больших временных затрат, а также в дополнительных требованиях к графической подсистеме ЭВМ, то есть в необходимости использования дорогих ЭВМ.

Наиболее универсальным способом является разработка отдельного программного комплекса. Такой подход позволит не опираться на внешнее программное обеспечение. Также отпадет необходимость сотрудничества с разработчиками программных пакетов. Функционал разрабатываемого программного комплекса будет зависеть от поставленных задач и ограничений. Однако его широкие функциональные возможности могут привести к значительному увеличению временных и финансовых затрат, необходимых для его реализации.

Использование последнего метода наиболее предпочтительно в случаях, когда имеются необходимые ресурсы. Такой подход позволит со временем увеличивать возможности и проводить более точные расчеты значительного числа параметров. В случае отсутствия ресурсов целесообразно использовать системы компьютерной алгебры.

Заключение

Разработанная эволюционная модель учитывает процесс изнашивания элементов зубчатого зацепления, вызванный трением.

Благодаря эволюционному характеру математической модели ее можно использовать для испытаний на трение, износ и ресурс работы. В разработанной модели учтены недостатки большинства ее современных аналогов и проведена комплексная работа по упрощению расчетов без вреда качественным показателям.

Таким образом, предложенная в работе математическая модель позволяет описать зубчатое зацепление без чрезмерного усложнения и провести расчеты с высокой точностью.

В работе произведена оценка возможности использования данной модели в программном обеспечении для ЭВМ, что позволит значительно ускорить все проводимые расчеты. Разработанные рекомендации по внедрению математической модели в программные комплексы для ЭВМ позволяют однозначно выбрать один из предложенных способов.

Разработка программного обеспечения на основе предложенной математической модели позволит значительно ускорить и удешевить процесс испытаний вновь разрабатываемых зубчатых колес, что однозначно будет способствовать улучшению качества продукции с одновременным уменьшением ее цены.

Публикации

1. Резников С.С., Акопян М.Г., Петров А.И. Анализ методов математического моделирования для исследования и изготовления зубчатых колес [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 1.
URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/56TVN116.pdf> (дата обращения: 17.10.16).
2. Резников С.С., Акопян М.Г., Федотова В.Н., Сотник А.В. Экспериментальное исследование эффективности технических средств противоугонной сигнализации [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 5.
URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/181TVN515.pdf> (дата обращения: 17.10.16).
3. Ярышев С.Н., Сотник А.В., Акопян М.Г., Дружинин А.Ю. Исследование влияния фильтра Байера на измерительные параметры камер системы видеонаблюдения // Вопросы радиоэлектроники, серия Техника телевидения. 2015. Вып. 6. С. 98–103.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612351. Программа для расчета эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций / М. Г. Акопян, С.С. Резников, А.И. Петров, О.В. Кузнецова, В.В. Токарев. Оpubл. 25.02.2016.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612352. Моделирование технологических аспектов нарезания зубчатых колес / М.Г. Акопян, С.С. Резников, А.И. Петров, О.В. Кузнецова, В.В. Токарев. Оpubл. 25.02.2016.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016620243. База данных для автоматизированного проектирования червячных зуборезных фрез и моделировании зубофрезерных операций / М.Г. Акопян, С.С. Резников, А.И. Петров, О.В. Кузнецова, В.В. Токарев. Оpubл. 17.02.2016.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617201. Программа моделирования перемещений червячной зуборезной фрезы и обрабатываемого колеса в процессе обработки / М.Г. Акопян, С.С. Резников, А.И. Петров, В.Н. Федотова, Д.Г. Суриков. Оpubл. 29.06.2016.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016616541. Программа для моделирования процесса обработки зубчатого колеса червячной зуборезной фрезой при любых комбинациях конструктивных параметров конволютных, архимедовых и эвольвентных фрез / М.Г. Акопян, С.С. Резников, А.И. Петров, О.В. Кузнецова, Д.Г. Суриков. Оpubл. 15.06.2016.
9. Акопян М.Г., Федотова В.Н. Обзор методов исследования изнашивания зубчатых колес [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: http://kmu.ifmo.ru/collections_article/2024/obzor_metodov_issledovaniya_iznashivaniya_zubchaty_h_koles.htm (дата обращения: 02.12.16).
10. Акопян М.Г., Петров А.И. Разработка методов и алгоритмов моделирования процесса нарезания зубчатых колес // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 4. СПб., 2016. С. 137–139.
11. Акопян М.Г., Петров А.И. Формирование математической модели червячной зуборезной фрезы [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3293/3293.pdf> (дата обращения: 17.10.16).
12. Акопян М.Г., Петров А.И. Обзор методов компьютерного моделирования зубчатых колес // Сборника трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. Т. 1. СПб., 2016. С.11–16.

Литература

1. Резников С.С. Основы построения эволюционной модели процесса изнашивания зубчатого зацепления // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 296–298.
2. Егоров И.М. Применение методов математического моделирования для исследования и расчета изнашивания прямозубых цилиндрических передач: дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИТМО, 1985. – 160 с.



Александрова София Александровна
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: alexandrova_sophie@mail.ru

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

С.А. Александрова
Научный руководитель – доцент О.В. Слита

Цель проекта – реализация управления мощным асинхронным двигателем, то есть проектирование инвертора напряжения при условии наличия лишь напряжения постоянного тока величиной 175–320 В. Результаты предназначены для использования в разработках, связанных с управлением электродвигателем при наличии только постоянного напряжения. Данная задача актуальна, так как на практике чаще всего используются готовые частотные преобразователи, требующие напряжения питания переменного тока [1].

Особое внимание в работе уделяется задаче синтеза системы управления трансформаторным повышающим преобразователем напряжения: предложено решение проблем, которые появляются при проведении теоретических и экспериментальных исследований. Получена линейная математическая модель преобразователя с интервальными параметрами. Предлагаются подходы к решению задачи обеспечения параметрической инвариантности выхода преобразователя относительно вариаций параметров его математической модели и возмущающего воздействия, а также существенного изменения входного напряжения.

В исследовании можно выделить три основных этапа.

Этап 1. Постановка проблемы, разработка структурной и принципиальной электрической схем

Если необходимо обеспечить управление асинхронным двигателем (АД) привода компрессорной станции мощностью 75 кВт, для которого требуется напряжение переменного трехфазного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В, а в наличии лишь напряжение сети постоянного тока (175–320 В), то необходимо разработать автономный инвертор напряжения (АИН), который решит эту проблему. Структурная схема системы, состоящей из АИН и АД, представлена на рис. 1.

В структуре АИН можно выделить две части: силовую и управляющую.

При подобных параметрах сети в силовую часть АИН требуется ввести повышающий преобразователь напряжения, состоящий из мостового инвертора, нагруженного на силовой трансформатор, подключенный к диодному мосту [2], схема замещения которого представлена на рис. 2.

На рис. 2: L_d – индуктивность дросселя в первичной обмотке трансформатора; R_d – сопротивление обмотки дросселя; L_1 и R_1 – индуктивность рассеяния и сопротивление первичной обмотки трансформатора; L_m , L_2 и R_2 – индуктивности намагничивания и рассеяния, а также сопротивление вторичной обмотки, приведенной к первичной; C_b и R_n – емкость конденсаторной батареи и сопротивление нагрузки, приведенные к первичной обмотке (не приведенное сопротивление составляет 4 Ом, что соответствует 100 кВт); D_v – диодный двухполупериодный выпрямитель.

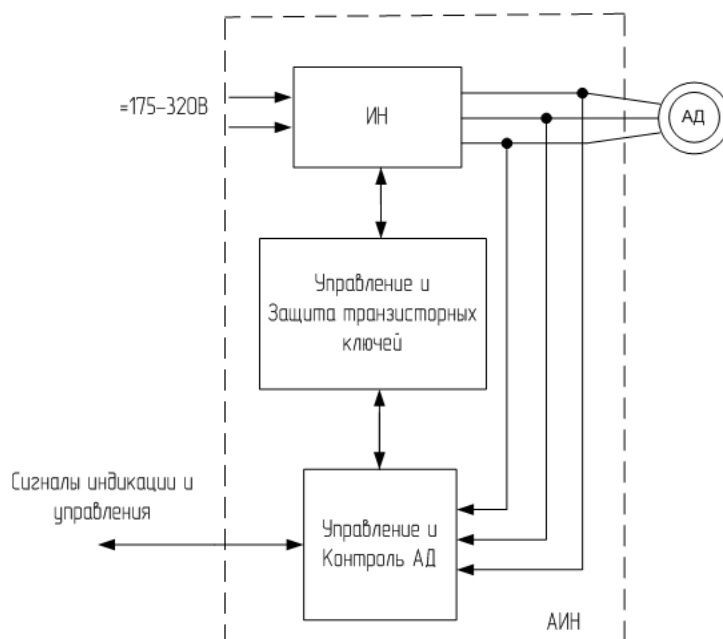


Рис. 1. Структурная схема системы

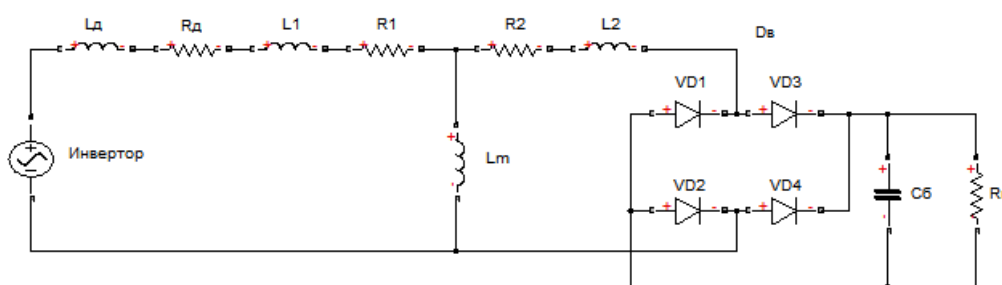


Рис. 2. Схема замещения системы «мостовой инвертор – трансформатор – выпрямитель – фильтр – нагрузка»

Работа подобной системы заключается в поддержании заданного среднего значения напряжения (610 В) на выходе диодного моста с фильтром за счет регулирования с использованием отрицательных обратных связей. Оно должно поддерживаться постоянным, несмотря на изменение входного напряжения. Стабилизированное постоянное напряжение является входным для трехфазного мостового инвертора напряжения.

В качестве ключей АИН используются интеллектуальные силовые IGBT-модули.

В системе автоматического управления (САУ) АИН можно выделить две подсистемы: систему управления преобразователя входного постоянного напряжения в регулируемое промежуточное и систему преобразователя из промежуточного напряжения в регулируемое трехфазное.

Этап 2. Математическое описание повышающего преобразователя

Необходимо отметить, что анализ преобразователей с силовыми трансформаторами имеет некоторые особенности, обусловленные электромагнитным преобразованием энергии в трансформаторах. Предположим, что трансформатор идеален, то есть сопротивления и индуктивности рассеяния его обмоток приблизительно равны нулю. Тогда преобразователь напряжения на мостовом инверторе будет иметь вид понижающего преобразователя, эквивалентная схема которого представлена на рис. 3. Она включает в себя индуктивность L , емкость C и ключ S , имеющий два положения (верхнее – ключ разомкнут, нижнее – ключ замкнут) [3].

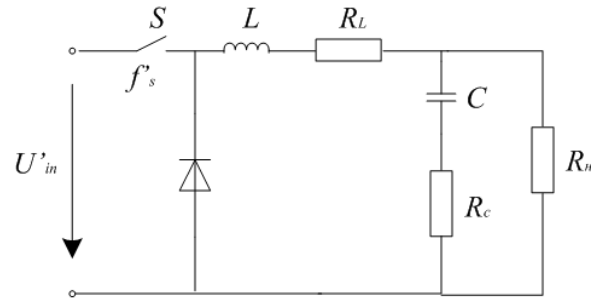


Рис. 3. Эквивалентная схема трансформаторного преобразователя на инверторе

На рис. 3: $U'_{in} = \frac{U_{in}}{n}$, где n – коэффициент трансформации, $n = \frac{w_1}{w_2}$; $f'_s = 2f_s$, где f_s –

частота коммутации ключей. Преобразователь подключен к нерегулируемому источнику напряжения постоянного тока, $U'_{in} = [U_{in}, \overline{U'_{in}}]$. Стабилизация выходного напряжения на активной нагрузке R_n достигается путем регулирования времени открытого состояния силового ключа S относительно периода переключения и величины рабочего цикла, посредством обратной связи.

Благодаря периодической коммутации силовых ключей (транзисторов, диодов) преобразователь является схемой с переменным состоянием. Математический анализ таких схем сводится к решению систем дифференциальных уравнений на различных интервалах времени импульса и паузы (для режима непрерывного тока), затем можно получить систему с матрицами, усредненными за периоды импульса и паузы. Метод усреднения необходим для анализа динамики преобразователя, но при условиях высокой частоты коммутации и обеспечения устойчивости системы, удаленной от ее границы [4]. Применение метода усреднения должно быть хорошо обдуманным, так как преобразователи являются дискретными нелинейными системами, при выходе которых из режима работы непрерывного тока линеаризованная модель становится недействительной. Поэтому важной задачей является определение граничных условий перехода в режим прерывистого тока. Соблюдение этих условий позволит уменьшить износ дорогостоящих элементов и достичь полного использования полезной постоянной составляющей выходного напряжения.

Предположим, что $R_C \approx 0$. Методом усреднения матриц за периоды импульса и паузы было получено описание системы:

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{d\eta} = -R_L i_L - u_n + \gamma U'_{in} \\ C \frac{du_n}{d\eta} = i_L - \frac{u_n}{R_n} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\gamma = \tau/T$ – относительная длительность нахождения ключа S в положении «1» в течение периода коммутации T , τ – длительность замкнутого положения ключа.

Индуктивность рассеяния имеет решающее значение для достижения режима непрерывного тока и устранения потерь при переключении транзисторов. Если значение индуктивности недостаточно, тогда последовательно с первичной обмоткой включают выравнивающий дроссель. В этом случае под индуктивностью L понимается сумма обеих вышеупомянутых индуктивностей. Для получения схемы замещения было введено предположение об идеальности трансформатора. В этом случае достаточно сложно точно определить величину индуктивности эквивалентной схемы (рис. 3) [5], поэтому наиболее корректно выразить ее интервальным числом $L = [L, \overline{L}]$. Изменение входного напряжения можно также выразить с помощью интервального значения $U'_{in} = [U_{in}, \overline{U'_{in}}]$.

В выражении (1) управляющим сигналом является относительная длительность замыкания

ключа в период коммутации γ , тогда матрицы, описывающие объект управления (ОУ), примут интервальный вид:

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{[R_L]}{[L]} & -\frac{1}{[L]} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_n C} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} [U'_{in}] \\ [L] \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \ 1]. \quad (2)$$

Тем самым получено описание ОУ с интервальными параметрами, заданного в форме «вход – состояние – выход»:

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t), \quad x(t)|_{t=0} = x(0), \quad y(t) = Cx(t), \quad (3)$$

где $x \in R^n, u \in R^r, y \in R^m$, x, u, y – векторы состояния, управления и выхода $A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times r}, C \in R^{m \times n}$, A, B, C – матрицы состояния, управления и выхода, ΔA – неопределенность задания матрицы состояния, ΔB – неопределенность задания матрицы управления для данного преобразователя напряжения.

Этап 3. Синтез робастной замкнутой системы и ее моделирование

Поставим задачу синтеза закона управления (ЗУ), обеспечивающего требуемые показатели качества замкнутой системы в переходном и установившемся режимах, для ОУ (3) вида:

$$u(t) = K_g g(t) - Kx(t), \quad (4)$$

где K_g – матрица прямых связей по задающему воздействию, K – матрица обратных связей по вектору состояния; $g \in R^m$, g – вектор внешнего воздействия.

Замкнутая система, образованная объединением ОУ (3) и ЗУ (4), принимает вид:

$$\dot{x}(t) = (F + \Delta F)x(t) + (G + \Delta G)g(t), \quad y(t) = Cx(t), \quad (5)$$

где $F \in R^{n \times n}, G \in R^{n \times r}$, $F, G, \Delta F, \Delta G$ – матрицы состояния и управления проектируемой системы и их неопределенности заданий соответственно:

$$F = A - BK, \quad G = BK_g, \quad \Delta F = \Delta A - \Delta BK, \quad \Delta G = \Delta BK_g. \quad (6)$$

Таким образом, стоит задача обеспечения параметрической инвариантности выхода преобразователя относительно вариаций параметров его математической модели [6].

Для того чтобы неопределенность содержалась только в матрице состояния, то есть для исключения неопределенности матрицы управления, расширим систему – введем в канал управления буферную систему, которая будет являться частью ЗУ.

Дополним исходный ОУ буферной системой:

$$\dot{x}_B(t) = A_B x_B(t) + B_B u_B(t); \quad x_B(0); \quad y_B(t) = C_B x_B(t) \quad (7)$$

где x_B – ℓ -мерный вектор состояния буферной системы (БС), u_B – r -мерный вектор входа, y_B – r -мерный вектор выхода, A_B ($n_B \times n_B$) – матрица состояния, B_B ($n_B \times r$) – матрица входа, C_B ($r \times \ell$) – матрица выхода.

Агрегирование ОУ и БС осуществляется путем наложения условия:

$$u(t) = y_B(t). \quad (8)$$

Введем в рассмотрение вектор состояния агрегированного объекта управления $\tilde{x} = \text{col}\{x, x_B\}$ с размерностью $\tilde{n} = n + n_B$. Тогда векторно-матричное описание агрегированного объекта примет вид:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}\tilde{u}(t), \quad (9)$$

$$x(t) = \tilde{C}_x\tilde{x}(t); y_B = \tilde{C}_B\tilde{x}(t); y(t) = \tilde{C}_y\tilde{x}(t). \quad (10)$$

где матрицы \tilde{A} , \tilde{B} и \tilde{C} :

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (A + \Delta A) & (B + \Delta B)C_B \\ 0 & A_B \end{bmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B_B \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\tilde{C}_x = \begin{bmatrix} I_{n \times n} & 0_{n_B \times n_B} \end{bmatrix}, \tilde{C}_B = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n_B \times n_B} \end{bmatrix}, \tilde{C}_y = \begin{bmatrix} C & 0_{n_B \times n_B} \end{bmatrix}.$$

Теперь закон управления (4) можно переписать:

$$\tilde{u}(t) = \tilde{K}_g g(t) - \tilde{K}\tilde{x}(t). \quad (12)$$

В качестве буферной системы введем интегрирующее звено, тогда матрицы \tilde{A} , \tilde{B} и \tilde{C} примут вид:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -\frac{[R_L]}{[L]} & -\frac{1}{[L]} & \frac{[U'_{in}]}{[L]} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_n C} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \tilde{C} = [0 \ 1 \ 0]. \quad (13)$$

В работе рассмотрен преобразователь с параметрами: $C = 9,9$ мФ; $R_n = 4$ Ом; $U_{in} = [175; 310]$ В; $L = [60; 75]$ мкГн; $f_s = 10$ кГц; $n = 0,2$; выходное напряжение которого должно быть стабилизировано и составлять $U_n = 610 \text{ В} \pm 10\%$, то есть требуется обеспечить ε -инвариантность выхода системы с заданным значением $\varepsilon = 10\%$. К показателям системы заданы следующие требования: длительность переходного процесса $t_{nn} \leq 0,6$ с и величина перерегулирования $\sigma = 0\%$.

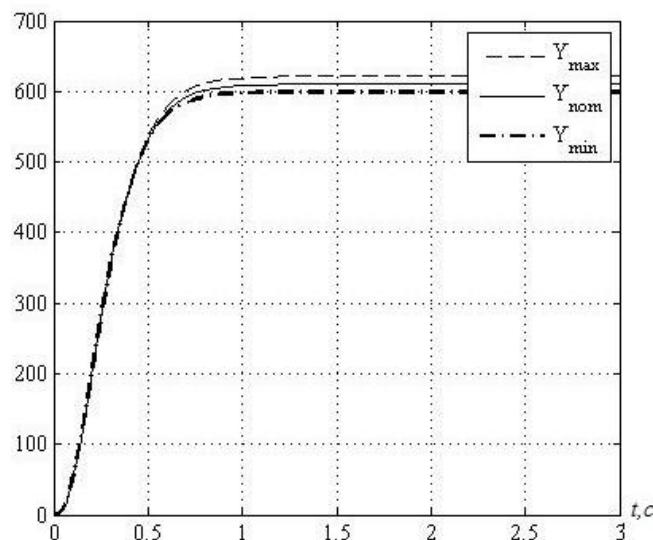


Рис. 4. Выходы для номинальной и угловых версий синтезированной системы

Для плавного пуска и исключения перерегулирования был синтезирован закон модального управления для номинального ОУ на основе биномиальной модальной модели при значении характеристической частоты $\omega_0 = 8\text{с}^{-1}$. Результаты моделирования представлены на рис. 4 в виде воспроизведения задающего воздействия $g(t) = 610\text{ В}$ при медианном и двух угловых реализациях параметров ОУ.

Полученные результаты показывают, что была достигнута ε – инвариантность выхода системы, величина которой меньше заданной, а значение стабилизированного выходного напряжения составило $U_n = 610\text{ В} \pm 3\%$.

Заключение

Разработан автономный инвертор напряжения, работающий при питании напряжением постоянного тока, величина которого может значительно меняться (175–320 В). Рассмотрена схема замещения трансформаторного преобразователя напряжения, для которой характеристики индуктивности в связи с трудностями измерения заданы интервальными значениями. Для полученной непрерывной линейной модели обеспечена инвариантность выхода в некотором приближении к возмущающему воздействию и неопределенности параметров. Спроектированная замкнутая система управления позволяет получить желаемую стабилизацию выхода, являющегося входом для трехфазного преобразователя частоты.

Публикации

1. Александрова С.А., Слита О.В. Проблемы разработки и проектирования САУ для мощного повышающего преобразователя напряжения // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 1. СПб., 2016. С. 41–43.
2. Александрова С.А., Слита О.В., Сударчиков С.А. Концепция относительной интервальности в задаче достижения робастности непрерывных систем управления [Электронный ресурс] // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М., 2014. С. 929–937. 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).
3. Александрова С.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Буферная система как структурный способ достижения параметрической инвариантности выхода // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). СПб., 2014. С. 24–28.

Литература

1. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Транзисторная преобразовательная техника. М., 2005. – 632 с.
2. Рама Редди С. Основы силовой электроники. М., 2006. – 288 с.
3. Чети П. Проектирование ключевых источников электропитания. М., 1990. – 240 с.
4. Коршунов А.И. Методика построения непрерывных моделей импульсных преобразователей напряжения постоянного тока // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 21–27.
5. Лурье М.С., Лурье О.М. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники. Учебное пособие. Красноярск, 2007. – 138 с.
6. Слита О.В., Ушаков А.В. Обеспечение инвариантности выхода непрерывной системы относительно экзогенных сигнальных и эндогенных параметрических возмущений: алгебраический подход // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 24–32.



Балбекин Николай Сергеевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: nbalbekin@niuitmo.ru

МОНИТОРИНГ СВОЙСТВ ПОЛИАКРИЛАТОВ НА РАЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭТАПАХ ИХ СИНТЕЗА, А ТАКЖЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКРИЛОВЫХ ПОЛИМЕРОВ В КАЧЕСТВЕ ДИСПЕРСИОННЫХ СРЕД В ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ГОЛОГРАФИИ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

Н.С. Балбекин

Научный руководитель – доцент Н.В. Петров

Цели проекта – разработка метода получения изображений и визуализации внутренней структуры объектов, обладающих ярко выраженными дисперсионными свойствами в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот, а также апробация полиакрилатов методом терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени в качестве дисперсионных сред.

В ходе выполнения работ был предложен и апробирован метод, а также написан и отлажен программный пакет для получения изображений и визуализации внутренней структуры объектов для повышения точности цифровой терагерцовой спектроскопии, голографии, томографии, дефектоскопии и бесконтактной диагностики объектов, обладающих дисперсионными свойствами в терагерцовом диапазоне частот. Созданное программное обеспечение уменьшает трудозатраты и время, необходимое на обработку как экспериментальных, так и смоделированных данных, что позволяет быстро получить достоверную информацию об объекте исследования.

На первом этапе для отбора материалов с выраженной дисперсией показателя преломления в ТГц-диапазоне частот был проведен ряд экспериментов на ТГц-спектрометре (рис. 1), позволяющем регистрировать зависимости величины напряженности электрического поля терагерцового излучения от времени (или от шага линейного моторизированного транслятора), прошедшего через исследуемый объект или отраженного от него.

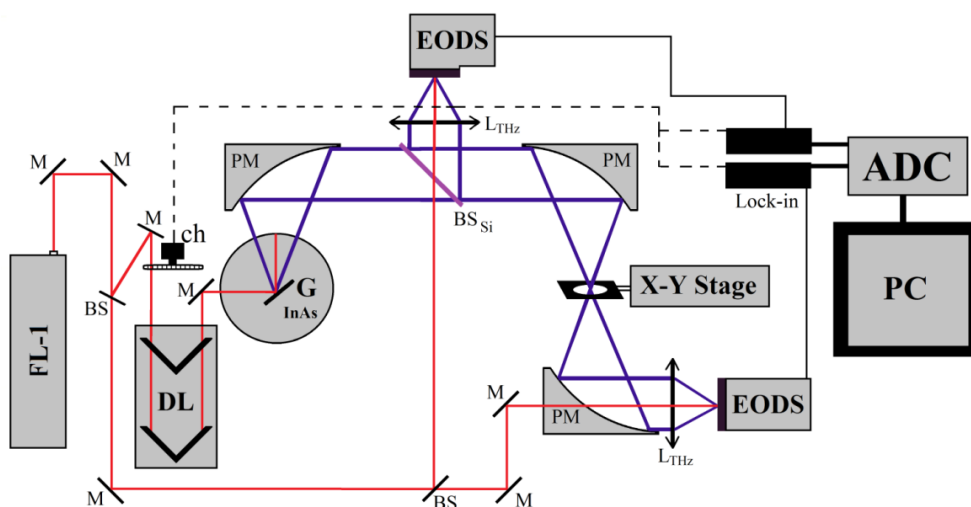


Рис. 1. Схема универсального ТГц-спектрометра [1–7]

На рис. 1: FL-1 – лазер фемтосекундных импульсов на Yb: KYW; М – зеркала; BS – светоделители; DL – оптическая линия задержки; G – генератор ТГц-излучения на основе кристалла InAs; PM-450 параболические зеркала; LTHz – линзы из полимера TPX с фокусным расстоянием $f = 5$ см; BSSi – светоделитель ТГц-излучения на основе пластины из высокоомного кремния; *ch* – оптико-механический модулятор; X-Y Stage – трехкоординатный линейный транслятор; EODS – электрооптическая система детектирования на основе кристалла CdTe; ADC – аналого-цифровой преобразователь; Lock-in – синхронный усилитель; PC – персональный компьютер.

Среди исследованных материалов наиболее ярко выраженной дисперсией показателя преломления обладали полиакрилаты натрия с различной степенью нейтрализации. Для определения оптических свойств образцов в терагерцовом диапазоне частот был использован метод расчета показателя преломления среды посредством анализа объектного терагерцового импульса, прошедшего через исследуемый объект, и опорного импульса, зарегистрированного без использования объекта [8]. В данном методе было применено исходное распределение амплитуды электрического поля терагерцового импульса для последующего извлечения фазовой информации для монохроматических частотных компонент спектра путем применения метода Фурье-анализа с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Расчет дисперсии показал, что разброс показателя преломления в диапазоне от 0,15 до 1,5 ТГц для образца S10N4 составляет около 0,6 (рис. 2).

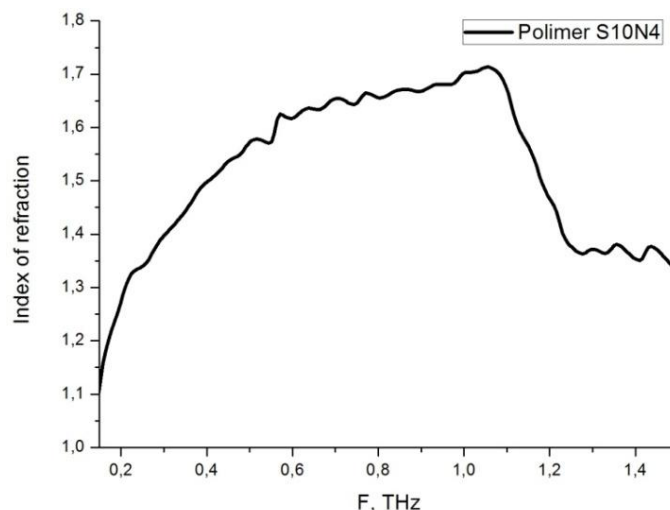


Рис. 2. Дисперсия образца полиакрилата натрия S10N4, обладающего наибольшей дисперсией среди полиакрилатов, полученная из экспериментальных данных

Разработка метода получения изображений и визуализации внутренней структуры объектов, обладающих дисперсионными свойствами в терагерцовом диапазоне частот

Полученная зависимость показателя преломления от частоты использовалась для формирования исходного распределения фазы отдельных частотных Фурье-компонент спектра тест-объекта. В качестве амплитудной маски тест-объекта использовалось распределение Гаусса (рис. 3а), а в качестве фазовой – тест-объект с градиентным рельефом «Фазовый муравей» (рис. 3б). Моделирование записи и восстановления голограммы осуществлялось по методу THz РТДН с использованием численного расчета распространения волнового фронта, основанного на методах представления поля через угловой спектр плоских волн и свертки поля с импульсным откликом системы. Более подробно метод терагерцовой голографии с разрешением во времени описан в статье [9].

Расчет проводился для случаев, когда $n = n(\nu)$ и $n = const$. После моделирования записи и восстановления голограммы были получены пространственно-частотные распределения

фазы в плоскости объекта. На рис. 4 показаны фазовые портреты восстановленных голограмм на отдельных частотах ТГц-спектра для случаев с дисперсией показателя преломления (рис. 4а) и без нее (рис. 4б). При сравнении изображений на одинаковых частотах отчетливо видна разница в фазовом набеге, вызванная дополнительным фазовым набегом при $n = n(\nu)$, что необходимо учитывать.

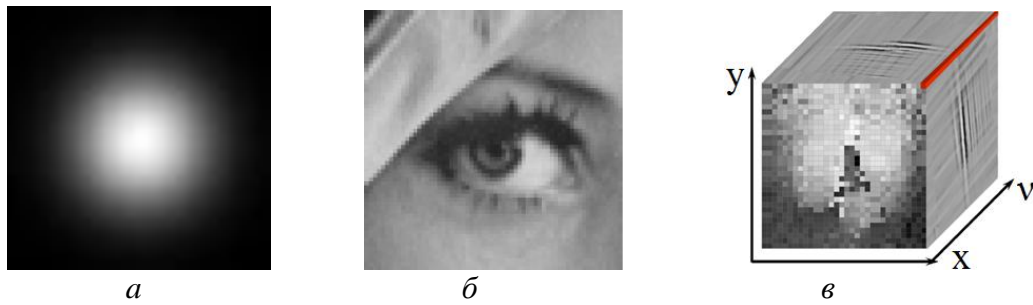


Рис. 3. Начальное распределение: а – амплитуды, б – фазы тест-объекта, в – зарегистрированная цифровая голограмма

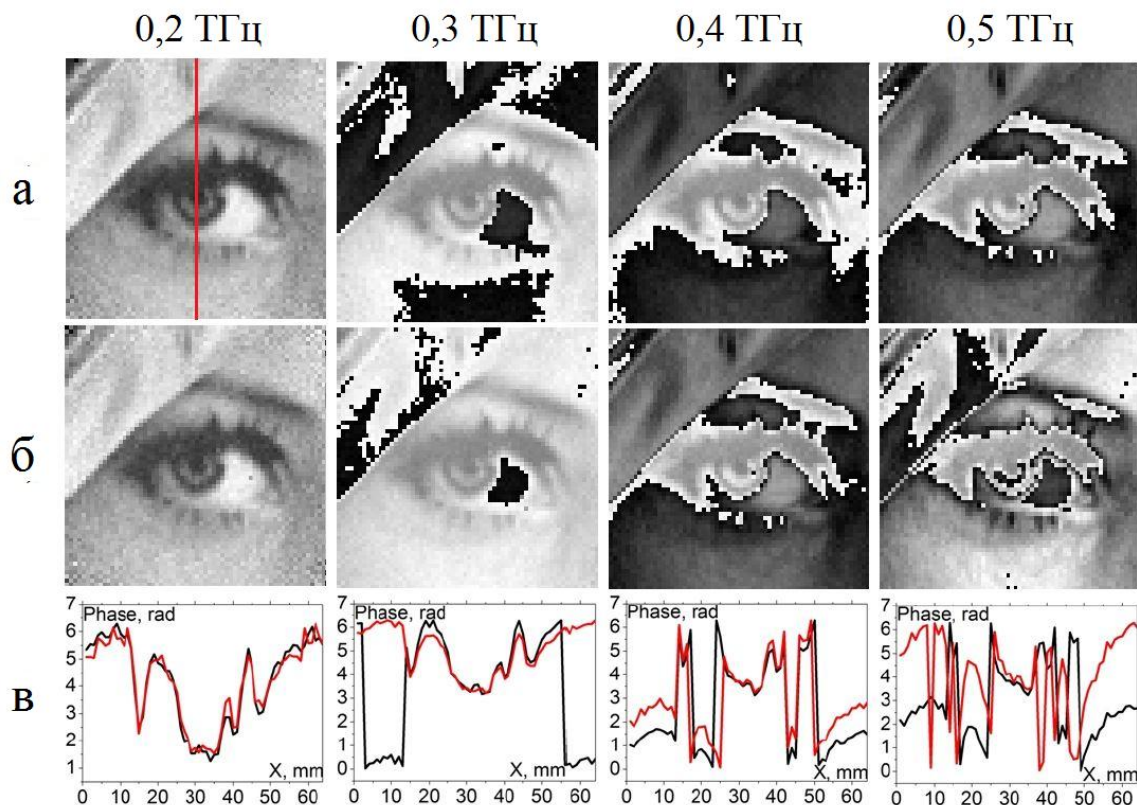


Рис. 4. Восстановленные фазовые изображения: а – с учетом; б – без учета дисперсии на различных частотах в ТГц-диапазоне; в – сечения: черная линия для случая а, красная линия – для случая б

На рис. 4в представлены сечения фазовых рельефов изображений на частотах 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 ТГц для случаев с дисперсией и без. Из графиков, представленных на рис. 5, видно необычное поведение фазовой задержки, полученное путем сравнения фазовых набегов в одной точке изображения. Данные кривые демонстрируют различную динамику фазового сдвига. Очевидно, что учет дисперсии приводит к изменению фазового запаздывания в частотной области, характер которого аналогичен кривой дисперсии на рис. 2. Если при переходе от фазовых характеристик для всей частотной области к рельефу не учитывать дисперсию, то это приведет к появлению флуктуаций рельефа на частотной шкале, что

является очевидно некорректным, поскольку параметр высоты объекта в точке не зависит от длины волны излучения, с помощью которой этот рельеф восстанавливается (рис. 5б).

В случае неоднородного составного объекта необходимо принимать во внимание все спектральные компоненты ν_i (рис. 3в) в каждой точке плоскости объекта и учитывать их влияние на восстановление изображения его рельефа. При расчете рельефа с учетом суммирования по всей частотной области ошибка будет проявляться в виде отклонений функции рельефа восстановленного объекта от эталонного. При этом отмечено, что увеличение расстояния между плоскостью объекта и плоскостью голограммы приводит к накоплению ошибки, связанной с увеличением оптической длины пути и как следствие – с дополнительным фазовым набегом. Таким образом, дисперсия материала вносит весомый вклад в восстановление рельефа объекта, что продемонстрировано на рис. 6. Здесь показаны: рельеф начального тест-объекта (серая линия); полностью восстановленный мультиволновый рельеф объекта, смоделированный без учета дисперсии (черная линия); моделирование с учетом дисперсии (зеленая линия), а также случай с учетом дисперсии во время записи голограммы (красная линия), но исключая дисперсию во время ее восстановления. Если не учитывать дисперсию материала во время перехода от фазы к рельефу, это приведет к изменению восстановленного фазового рельефа объекта и далее к некорректным данным при исследовании объектов, спрятанных в дисперсионных средах.

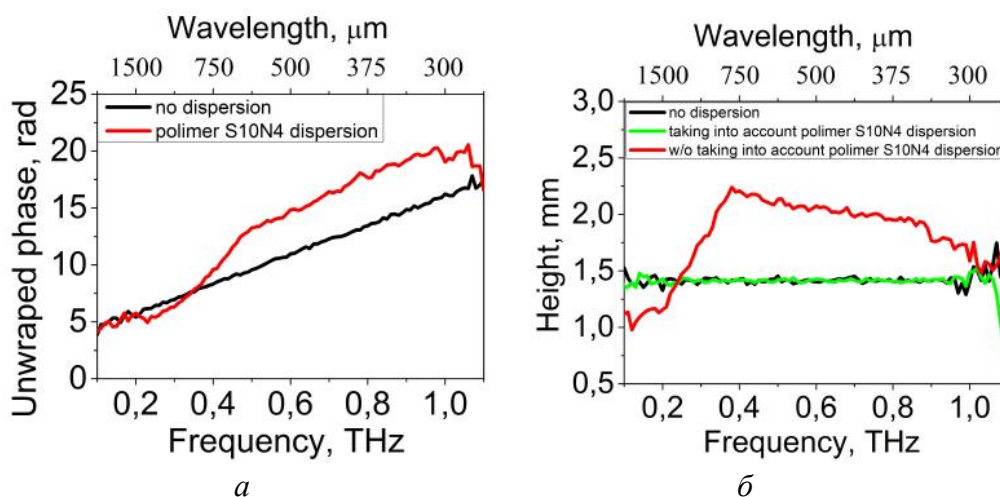


Рис. 5. Характеристики восстановленного объекта в точке ($x = 5$, $y = 25$): а – изменения в фазовом запаздывании; б – зависимость рельефа объекта в частотном диапазоне

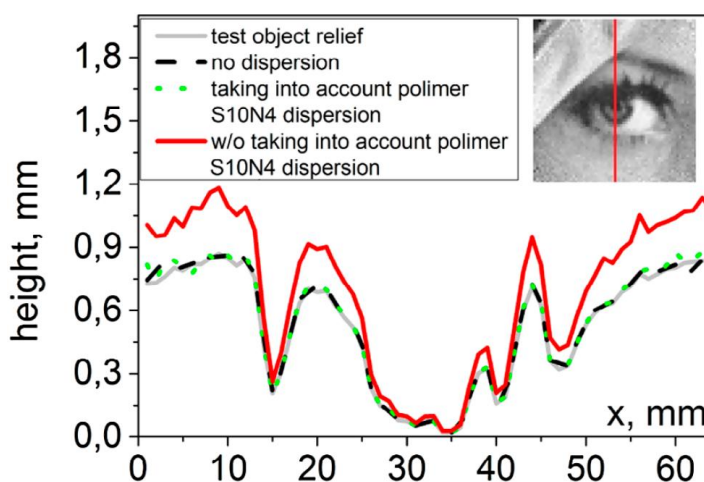


Рис. 6. Сечения восстановленного объекта при различных видах моделирования

Заключение

Рассмотрена математическая модель голографического восстановления рельефа фазового объекта из дифракционных картин импульсного терагерцового излучения, записанных в дисперсионной среде. Дополнены алгоритмы численного распространения волнового фронта для учета дополнительного фазового набега на каждой частотной компоненте, возникающего из-за распространения в дисперсионной среде. Проведено сравнение восстановленных фазовых изображений для случаев учета и не учета дисперсии в среде распространения и в исследуемом объекте.

Публикации

1. *Balbekin N.S., Kulya M.S., Rogov P.Y., Petrov N.V.* The modeling peculiarities of diffractive propagation of the broadband terahertz two-dimensional field // *Physics Procedia*. 2015. Vol. 73. P. 49–53.
2. *Petrov N.V., Kulya M.S., Tsyarkin A.N., Bepalov V.G., Gorodetsky A.A.* Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. Vol. 6. No 3. P. 464–472.

Литература

1. *Zhang X.C., Xu J.* Introduction to THz wave photonics. Springer, 2010. P. 201–204.
2. *Bepalov V.G.* Methods of generating superbroadband terahertz pulses with femtosecond lasers // *Journal of Optical Technology*. 2008. Vol. 75. No. 10. P. 636–642.
3. *Balbekin N.S. et al.* The versatile terahertz reflection and transmission spectrometer with the location of objects of researches in the horizontal plane // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 584. No 1. P. 012010.
4. *Gürtler A. et al.* Terahertz pulse propagation in the near field and the far field // *Journal of the Optical Society of America A*. 2000. Vol. 17. No 1. P. 74–83.
5. *Izumida S. et al.* Spectrum control of THz radiation from InAs in a magnetic field by duration and frequency chirp of the excitation pulses // *Applied Physics Letters*. 1999. Vol. 75. No 4. P. 451–453.
6. *Mittleman D.M. et al.* Noncontact semiconductor wafer characterization with the terahertz hall effect // *Applied Physics Letters*. 1997. Vol. 71. No 1. P. 16–18.
7. *Lee Y.-S.* Principles of terahertz science and technology. Springer, 2009. – 340 p.
8. *Chan W.L. et al.* Imaging with terahertz radiation // *Reports on Progress in Physics*. 2007. Vol. 70. No 8. P. 1325–1380.
9. *Petrov N.V. et al.* Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016. Vol. 6. No 3. P. 464–472.



Белоусов Кирилл Ильич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра нанотехнологий и материаловедения
E-mail: bazylevd@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МИКРОФЛЮИДНОГО ЧИПА ДЛЯ ФИКСАЦИИ ЕДИНИЧНЫХ КЛЕТОК

К.И. Белоусов

Научный руководитель – профессор А.А. Евстрапов

Концепция микроаналитических систем была предложена А. Манцем в 1989 году [1]. Суть ее сводилась к интеграции всех стадий анализа на одном микрофлюидном чипе площадью несколько квадратных сантиметров с разветвленной системой каналов микронных размеров, в которых должна осуществляться предварительная подготовка пробы, требуемые манипуляции с ней, разделение ее компонентов и последующее их детектирование. Создание микрофлюидных аналитических систем во многом обусловлено необходимостью получения результатов анализа на месте отбора проб в реальном времени для принятия оперативных решений. Кроме того, такие приборы имеют преимущества в обычных лабораториях за счет меньшего веса, габаритов, расхода электроэнергии и реактивов, высокой чувствительности анализа по сравнению с их традиционными аналогами. Микрофлюидные технологии также предоставляют уникальные возможности для манипулирования отдельными клетками: проведение более дешевой, по сравнению с проточной цитометрией, их сортировки, основанной на различных физических принципах (гидродинамических [2], диэлектрофоретических [3], магнитных [4] и других); точную фиксацию в пространстве и получение аналитической информации от отдельных клеток [5].

Анализ клеток является неотъемлемой частью научных исследований и клинической диагностики. Однако в ряде традиционных методов тысячи и миллионы клеток выращиваются без учета того, что взаимодействие между ними может влиять на результаты исследования, а отдельные клетки даже одного происхождения отличаются друг от друга по ряду параметров, таких как стадия жизненного цикла, специфические особенности метаболизма, размеры [6]. Из-за этих различий отдельные клетки по-разному реагируют на одно и то же воздействие в одних и тех же условиях, а получение усредненных данных может привести к неадекватным выводам [7]. Изучение их популяций на уровне отдельных клеток открывает новые возможности для персонализированной диагностики, создания эффективных лекарств и высокочувствительных биосенсоров [8].

Целью выполнения работы было проведение оптимизации микрофлюидного чипа для фиксации единичных клеток в пространстве путем выбора формы ловушек и их расположения в камере чипа, обеспечивающих наибольшую вероятность захвата микрочастиц. Для достижения данной цели были выполнены следующие задачи:

- найден диапазон начальных смещений частиц от оси канала, при которых происходит их захват в единичных ловушках различной формы, расположенных по центру канала;
- найдены диапазоны начальных смещений частиц от оси канала, при которых происходит их захват в ловушках, расположенных в массиве;
- найдена вероятность захвата второй частицы в уже заполненной ловушке;

– изучено последовательное заполнение ловушек в массиве на предмет влияния на диапазон захвата частиц для еще свободных ловушек;

– исследована взаимосвязь вероятностей захвата частиц в ловушках с долей потока жидкости, протекающей через нее.

В процессе расчета траектории движения клеток в каналах микрофлюидного чипа скоростной профиль жидкости описывался с помощью системы уравнений Навье – Стокса и неразрывности. Сила, действующая на клетку со стороны жидкости, находилась путем интегрирования по ее границе множителей Лагранжа, полученных из ограничений на этой границе и имеющих в данном случае размерность силы на единицу площади. При этом расчет смещения частицы, основанный на втором законе Ньютона, проводился с использованием решателя обыкновенных дифференциальных уравнений в пакете программ *COMSOL Multiphysics* методом конечных элементов.

Был установлен диапазон начальных смещений частиц, при котором происходит их захват в одиночных ловушках (рис. 1). Он составил $\pm 0,5$ мкм относительно центра симметрии канала. Результаты моделирования не показали отличий в траекториях частиц при использовании гидродинамических ловушек различных форм, поскольку скоростной профиль течения жидкости перед ловушкой при изменении ее формы остается прежним. Поэтому для дальнейших исследований была выбрана круглая форма ловушки, как более технологичная.

Были найдены координаты начального положения частиц (Таблица), отсчитываемые от центральной оси входного канала, при которых происходит их захват в ловушках массива, представленного на рис. 2а. Полученные диапазоны координат были пересчитаны в вероятности захвата P . Для ловушек первого ряда захвата не происходит, при этом вероятности попаданий в другие ловушки коррелируют с долей потока жидкости, проходящей через ловушку (коэффициент корреляции – 97 %). Это свидетельствует о том, что основное влияние на вероятность захвата частицы в ловушке оказывает величина скорости потока жидкости, набегающего на ловушку, и симметричность скоростного профиля перед ловушкой. Для увеличения эффективности ловушки первого ряда были развернуты по потоку (рис. 2б), что позволило увеличить вероятность захвата в них клеток до значений, соответствующих ловушкам под номером 2.

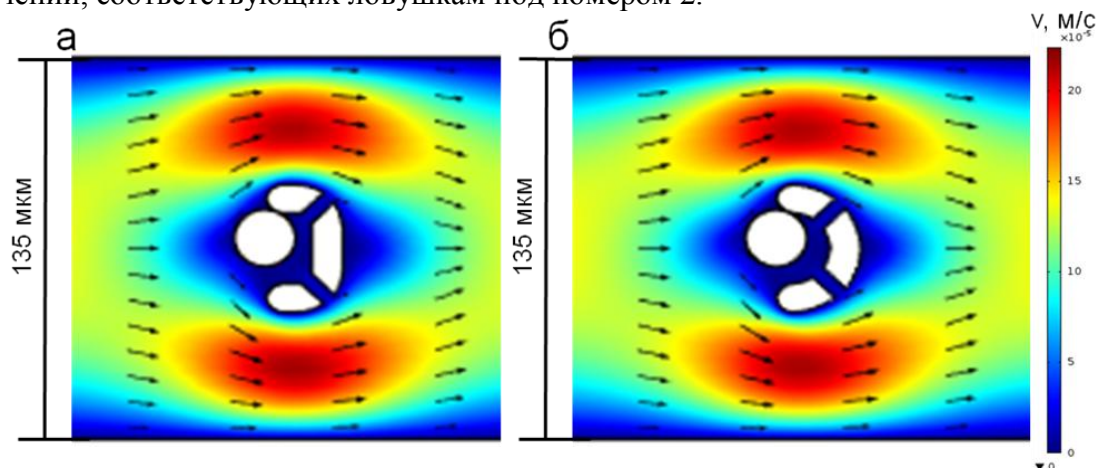


Рис. 1. Захват частицы в ловушке при начальном ее смещении относительно оси канала на 0,5 мкм: а – прямоугольной формы, б – полукруглой

Моделирование показало, что наличие в ловушке захваченной клетки препятствует попаданию в нее дополнительной частицы, а последовательное заполнение ловушек массива не меняет вероятность захвата клеток в свободных ловушках.

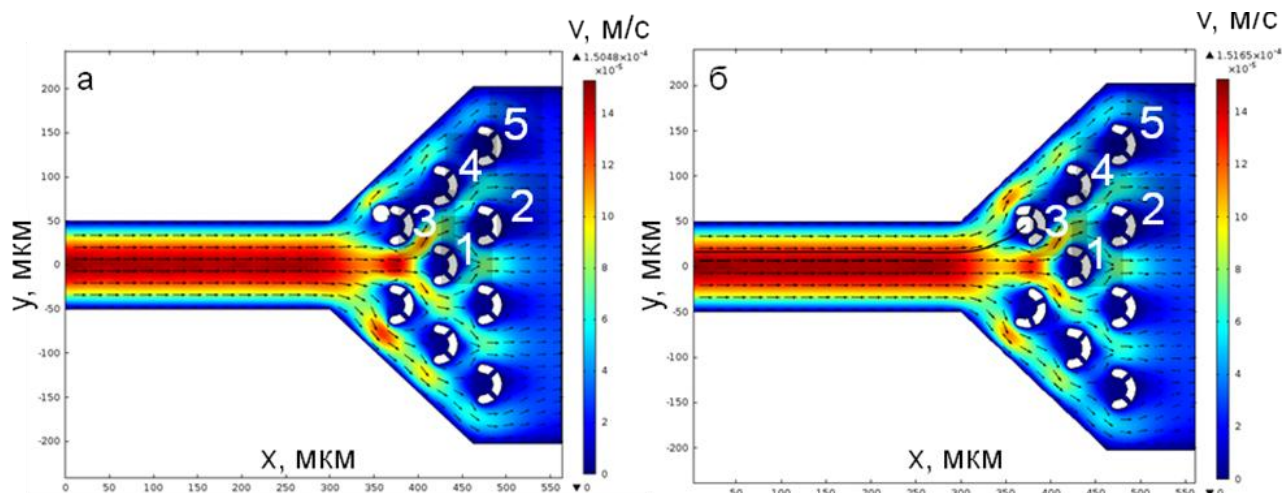


Рис. 2. Результаты моделирования движения клеток: а – обтекание частицей третьей ловушки при начальном ее смещении в 13 мкм относительно оси симметрии канала в топологии с неразвернутыми ловушками; б – захват частицы в третьей ловушке при начальном смещении 16 мкм относительно оси симметрии канала в топологии с развернутыми ловушками

Таблица

Координаты частиц, при которых происходит их попадание в ловушку, и рассчитываемые по ним вероятности захвата частиц

Номер ловушки	Координаты, мкм	P, %
1	[-0,5; 0,5]	1,25
2	[7,5; 7]	0,625
3	Не определено	Не определено
4	19,5	<0,625
5	25	<0,625

Заключение

В процессе выполнения проекта были получены следующие основные результаты.

1. Установлено, что изменение формы ловушки с учетом того, что ее ширина и ширина каналов-протоков не изменяются, не оказывает влияния на вероятность захвата частиц. Поэтому для дальнейших исследований была выбрана круглая форма ловушки, как более технологичная.

2. Определено, что основное влияние на вероятность захвата частицы в ловушке оказывает величина потока жидкости, проходящей через ловушку, и симметричность скоростного профиля перед ловушкой. Поэтому для увеличения эффективности захвата частиц необходимо располагать ловушки по потоку жидкости.

3. Вычислительный эксперимент показал, что в предложенной форме ловушки не происходит захвата второй частицы, а их последовательное заполнение в массиве не оказывает влияния на диапазон захвата частиц для еще свободных ловушек.

Данные результаты были использованы при создании микрофлюидного чипа для фиксации единичных клеток в пространстве, позволяющего исследовать влияние различных веществ на отдельные клетки, находящиеся в нативном состоянии на протяжении всего цикла их жизнедеятельности в реальном времени.

Публикации

1. Белоусов К.И., Кухтевич И.В., Евстратов А.А., Буляница А.Л. Моделирование процессов массопереноса и фиксации микрочастиц в микрофлюидных чипах с гидродинамическими ловушками // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2013. Вып. 2. С. 212–214.
2. Belousov K.I., Kukhtevich I.V., Bukatin A.S., Evstrapov A.A. Microfluidic chips with microscale traps for cancer cells study by confocal laser scanning microscopy [Electronic resource] // ePosters: The Online Journal of Scientific Posters. 2014. No EP21703. P. EP21703. URL: <http://www.eposters.net/pdfs/microfluidic-chips-with-microscale-traps-for-cancer-cells-study-by-confocal-laser-scanning.pdf> (accessed: 10.10.16).
3. Kukhtevich I.V., Belousov K.I., Bukatin A.S., Evstrapov A.A. Microfluidic chip with special traps for cancer cells study by means of confocal laser scanning microscopy // Sino-Russian Young Scientist Forum and Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. Abstracts. Qingdao, 2014. P. 94.
4. Кухтевич И.В., Белоусов К.И., Букатин А.С., Дубина М.В., Евстратов А.А. Микрофлюидный чип с гидродинамическими ловушками для микроскопических исследований одиночных клеток *in vitro* // Письма в журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 5. С. 103–110.
5. Kukhtevich I.V., Belousov K.I., Bukatin A.S., Dubina M.V., Evstrapov A.A. A Microfluidic chip with hydrodynamic traps for *in vitro* microscopic investigations of single cells // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41. No 3. P. 255–258.

Литература

1. Manz A. *et al.* Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing // Sensors and Actuators B: Chemical. 1990. Vol. 1. No 1. P. 244–248.
2. Martel J.M., Toner M. Particle focusing in curved microfluidic channels [Electronic resource] // Scientific Reports. 2013. Vol. 3. No 3340. URL: <http://www.nature.com/articles/srep03340> (accessed: 12.10.16).
3. Muratore M. *et al.* Biomarker-free dielectrophoretic sorting of differentiating myoblast multipotent progenitor cells and their membrane analysis by Raman spectroscopy // Biomicrofluidics. 2012. Vol. 6. No 3. P. 034113.
4. Zborowski M., Chalmers J.J. Rare cell separation and analysis by magnetic sorting // Analytical chemistry. 2011. Vol. 83. No 21. P. 8050–8056.
5. Blazek M. *et al.* Analysis of fast protein phosphorylation kinetics in single cells on a microfluidic chip // Lab on a Chip. 2015. Vol. 15. No 3. P. 726–734.
6. Walling M.A., Shepard J.R.E. Cellular heterogeneity and live cell arrays // Chemical Society Reviews. 2011. Vol. 40. No 7. P. 4049–4076.
7. Lidstrom M.E., Meldrum D.R. Life-on-a-chip // Nature Reviews Microbiology. 2003. Vol. 1. No 2. P. 158–164.
8. Wang T. *et al.* A cardiomyocyte-based biosensor for antiarrhythmic drug evaluation by simultaneously monitoring cell growth and beating // Biosensors and Bioelectronics. 2013. Vol. 49. P. 9–13.



Бойцев Антон Александрович
Факультет естественнонаучный
Кафедра высшей математики
E-mail: boitsevanton@gmail.com

РАСШИРЕНИЕ ТЕНЗОРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ТРОЕК

А.А. Бойцев

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

В результате работы «Явно решаемые модели взаимодействия электромагнитного поля и электрона на базе теории расширений операторов и метода граничных троек» построена явно решаемая модель взаимодействия релятивистского фермиона (оператор Дирака) и бозонов (бесконечный матричный оператор, действующий в фоковском пространстве) [1, 2]. Вся модель описывается оператором, представляющим собой сумму тензорных произведений операторов [9]. Для получения всевозможных самосопряженных расширений и матрицы рассеяния используется аппарат граничных троек [3–12], а также его усовершенствование для данного типа операторов. В абстрактном виде эти результаты были изложены в [13–16] лишь для случая, когда самосопряженный оператор ограничен.

Цель данного проекта – описание взаимодействия между квантовыми системами (электромагнитным полем и бозонами) с использованием теории расширений операторов и метод граничных троек, а также всевозможных его физических свойств.

Основная задача – усовершенствование (за счет теоремы регуляризации) и обобщение полученных в [16] результатов. Для достижения этого необходимо обобщить результаты, полученные нами в [13–15] на случай неограниченного самосопряженного оператора (за который отвечает оператор бозонов).

Более конкретно ставились следующие цели и задачи:

- выписать явно модель оператора, представляющего собой сумму тензорных произведений операторов, один из которых – оператор Дирака, изученный нами в [14, 15], а другой – оператор бозонов, действующий в пространстве Фока;
- обобщить результаты, полученные ранее в [13], на случай неограниченного самосопряженного оператора и построить его самосопряженные расширения, а также выписать гамма-поле и функцию Вейля;
- используя аналитическое представление функции Вейля, выписать матрицу рассеяния [17], которая дает всевозможные физические свойства данной.

Для получения расширений использовался аппарат граничных троек [3–12], [17].

Линейные отношения

Линейное отношение Θ в \mathcal{H} – это замкнутое линейное подпространство $\mathcal{H} \oplus \mathcal{H}$. Множество всех линейных отношений в \mathcal{H} обозначим $\tilde{C}(\mathcal{H})$. Обозначим множество всех замкнутых (не обязательно плотно заданных) операторов в \mathcal{H} – $C(\mathcal{H})$. Сопоставляя каждый оператор $T \in C(\mathcal{H})$ с его графиком $\text{gr}(T)$, мы увидим, что $C(\mathcal{H})$ является подпространством $\tilde{C}(\mathcal{H})$. Необходимость рассмотрения множества $\tilde{C}(\mathcal{H})$ в теории операторов мотивируется следующими соображениями: в отличие от множества $C(\mathcal{H})$, множество $\tilde{C}(\mathcal{H})$ замкнуто по

отношению к взятию сопряженного и обратного отношений Θ^* и Θ^{-1} , которые определяются следующими соотношениями:

$$\Theta^* = \left\{ \begin{pmatrix} k \\ k' \end{pmatrix} : (h', k) = (h, k'), \forall \left(\begin{pmatrix} h \\ h' \end{pmatrix} \in \Theta \right) \right\} \text{ и } \Theta^{-1} \{ \{g, f\} : \{f, g\} \in \Theta \}.$$

Линейное отношение Θ называется симметрическим, если $\Theta \subset \Theta^*$ и самосопряженным, если $\Theta = \Theta^*$.

Граничные тройки

Напомним некоторые основные факты, относящиеся к граничным тройкам. Пусть S – плотно заданный симметрический оператор с равными индексами дефекта $n_{\pm}(S) = \dim(R_{\pm i})$, где $R_z = \ker(S^* - z)$, $z \in C_{\pm}$, действующий на сепарабельном гильбертовом пространстве H .

Определение 1 [13]. Замкнутое расширение \tilde{S} оператора S называется правильным, если $\text{dom}(S) \subset \text{dom}(\tilde{S}) \subset \text{dom}(S^*)$. Два правильных расширения \tilde{S}' и \tilde{S} называются дизъюнктивными, если $\text{dom}(\tilde{S}') \cap \text{dom}(\tilde{S}) = \text{dom}(S)$, а к тому же трансверсальными, если $\text{dom}(\tilde{S}') + \text{dom}(\tilde{S}) = \text{dom}(S^*)$.

Обозначим множество всех правильных расширений S , пополненное остальными расширениями S и S^* , как Ext_S . Любое самосопряженное или максимальное диссипативное (аккумулятивное) расширение является правильным.

Определение 2 [13]. Тройка $\Pi = \{H, \Gamma_0, \Gamma_1\}$, где H – вспомогательное гильбертово пространство, $\Gamma_0, \Gamma_1 : \text{dom}(S^*) \rightarrow H$ – линейные отображения, называется граничной тройкой оператора $S^* S^*$, если выполнено соотношение:

$$(S^* f, g) - (f, S^* g) = (\Gamma_1 f, \Gamma_0 g) - (\Gamma_0 f, \Gamma_1 g), \quad f, g \in \text{dom}(S^*) \quad (1)$$

и отображение $\Gamma = (\Gamma_0, \Gamma_1)^T : \text{dom}(S^*) \rightarrow H \oplus H$ сюръективно.

Граничная тройка $\Pi = \{H, \Gamma_0, \Gamma_1\}$ для оператора S^* всегда существует, если $n_+(S) = n_-(S)$. Также стоит заметить, что $n_{\pm}(S) = \dim(H)$ и $\ker(\Gamma_0) \cap \ker(\Gamma_1) = \text{dom}(S)$.

С каждой граничной тройкой Π сопоставляют два канонических самосопряженных расширения $S_j = S^* |_{\ker(\Gamma_j)}$, $j \in \{0, 1\}$. Для любого расширения $S_0 = S_0^* \in \text{Ext}_S$ найдется (вообще говоря, не единственная) граничная тройка $\Pi = \{H, \Gamma_0, \Gamma_1\}$ оператора S^* такая, что $S_0 = S^* |_{\ker(\Gamma_0)}$.

С помощью подхода граничных троек, можно параметризовать все правильные расширения следующим образом.

Теорема 1 [13]. Пусть $\Pi = \{H, \Gamma_0, \Gamma_1\}$ – граничная тройка для оператора S^* . Тогда отображение:

$$\text{Ext}_S \ni \tilde{S} \rightarrow \Gamma \text{dom}(\tilde{S}) = (\Gamma_0 f, \Gamma_1 g)^T : f \in \text{dom}(\tilde{S}) = \Theta \in \tilde{C}(H) \quad (2)$$

устанавливает биекцию между Ext_S и $\tilde{C}(H)$. Мы пишем $\tilde{S} = S_{\Theta}$, если \tilde{S} отвечает Θ по биекции (2). Кроме того, верны следующие предложения:

- $S_{\Theta}^* = S_{\Theta^*}$, кроме того $S_{\Theta}^* = S_{\Theta}$ в том и только том случае, когда $\Theta = \Theta^*$;
- S_{Θ} является симметрическим (самосопряженным) в том и только том случае, когда Θ – симметрическое (самосопряженное) отношение;
- расширения S_0 и S_{Θ} дизъюнкты (трансверсальны) в том и только том случае, если найдется замкнутый (ограниченный) оператор B такой, что $\Theta = \text{gr}(B)$. В таком случае биекция принимает вид: $S_{\Theta} = S_{\text{gr}(B)} = S^*|_{\ker(\Gamma_1 - B\Gamma_0)}$.

В частности, $S_j = S^*|_{\ker(\Gamma_j)} = S_{\Theta_j}$, $j \in \{0, 1\}$, где $\Theta_0 = \{0\} \times \mathbb{H}$ и $\Theta_1 = \mathbb{H} \times \{0\} = \text{gr}(O)$, O – нулевой оператор в \mathbb{H} . Также стоит отметить, что $\tilde{C}(\mathbb{H})$ содержит тривиальные линейные соотношения $\{0\} \times \{0\}$ и $\mathbb{H} \times \mathbb{H}$, которые параметризуют расширения S и S^* соответственно для любой граничной тройки Π .

Гамма-поле, функция Вейля и формула Крейна

Напомним некоторые факты, касающиеся гамма-поля и функции Вейля.

Определение 3 [13]. Пусть $\Pi = \{\mathbb{H}, \Gamma_0, \Gamma_1\}$ – граничная тройка для оператора S^* и $S_0 = S^*|_{\ker(\Gamma_0)}$. Операторнозначные функции: $\gamma(\cdot): \rho(S_0) \rightarrow [\mathbb{H}, \mathbb{H}]$ и $M(\cdot): \rho(S_0) \rightarrow [\mathbb{H}]$, определяемые соотношениями: $\gamma(z) = (\Gamma_0|R_z)^{-1}$, $M(z) = \Gamma_1\gamma(z)$, $z \in \rho(S_0)$, называются гамма-полем и функцией Вейля, отвечающими граничной тройке Π соответственно.

Очевидно, что функция Вейля может быть определена и другим образом, как $M(z)\Gamma_0 f_z = \Gamma_1 f_z$, $f_z \in R_z$, $z \in \rho(S_0)$.

Так же следует заметить, что гамма-поле и функция Вейля голоморфны на $z \in \rho(S_0)$.

Для любого правильного (не обязательно самосопряженного) расширения $\tilde{S}_{\Theta} \in \text{Ext}_S$ с непустым резольветным множеством $\rho(\tilde{S}_{\Theta})$ имеет место следующая формула Крейна [4, 5]:

$$(S_{\Theta} - z)^{-1} - (S_0 - z)^{-1} = \gamma(z)(\Theta - M(z))^{-1} \gamma^*(\bar{z}), \quad z \in \rho(S_0) \cap \rho(S_{\Theta}). \quad (3)$$

Она видоизменяет стандартную формулу Крейна, которая справедлива для канонических расширений, на любые $\tilde{S}_{\Theta} \in \text{Ext}_S$ с $\rho(\tilde{S}_{\Theta}) \neq \emptyset$. Кроме того, ввиду определения гамма-поля и функции Вейля данная формула обладает прямой связью с граничными тройками. Приведем результаты, касающиеся суммы тензорных произведений операторов.

Теорема 2 [13]. Если $\Pi_A = \{\mathbb{H}_A, \Gamma_0^A, \Gamma_1^A\}$ – граничная тройка оператора A^* , тогда $\Pi_S = \{\mathbb{H}, \Gamma_0^S, \Gamma_1^S\}$ – граничная тройка для оператора S^* , где $\mathbb{H} = \mathbb{H}_A \otimes \mathbb{H}_T$, $\Gamma_0^S = \Gamma_0^A \otimes I$, $\Gamma_1^S = \Gamma_1^A \otimes I$.

Тогда для гамма-поля верна следующая теорема.

Теорема 3 [13]. Пусть $\Pi_A = \{\mathbb{H}_A, \Gamma_0^A, \Gamma_1^A\}$ – граничная тройка оператора A^* с гамма-полем $\gamma_A(z)$. Если $\Pi_S = \{\mathbb{H}, \Gamma_0^S, \Gamma_1^S\}$ – граничная тройка для оператора S^* , то гамма-поле $\gamma_S(z)$, отвечающее граничной тройке Π_S , допускает представление:

$$\gamma_S(z) = \int_a^b d\hat{E}_T(\lambda) \gamma_A(z - \lambda) \otimes I_{\mathbb{H}_T} = \int_a^b \gamma_A(z - \lambda) \otimes I_{\mathbb{H}_T} d\hat{E}_T(\lambda),$$

где $z \in C_{\pm}$, $\sigma(T) \subset [a, b)$.

Для функции Вейля справедлива следующая теорема.

Теорема 4 [13]. Пусть $\Pi_A = \{H_A, \Gamma_0^A, \Gamma_1^A\}$ – граничная тройка оператора A^* с функцией Вейля $M_A(z)$. Если $\Pi_S = \{H, \Gamma_0^S, \Gamma_1^S\}$ – граничная тройка для оператора S^* , то функция Вейля $M_S(z)$, отвечающая граничной тройке Π_S , допускает представление:

$$M_S(z) = \int_a^b d\hat{E}_T(\lambda) M_A(z - \lambda) \otimes I_{H_T} = \int_a^b M_A(z - \lambda) \otimes I_{H_T} d\hat{E}_T(\lambda),$$

где $z \in C_{\pm}$, $\sigma(T) \subset [a, b)$.

Теорема 5 (Теорема регуляризации [8]). Пусть $\{C_n\}_{n=1}^{\infty}$ – последовательность плотно заданных замкнутых симметрических операторов в сепарабельном гильбертовом пространстве Λ_n и $C = \bigoplus_{n=1}^{\infty} C_n$. Пусть также $\Pi_n = \{H_n, \Gamma_{0n}, \Gamma_{1n}\}$ – граничная тройка для C_n^* , M_n – соответствующая функция Вейля, и $Q_n = R(M_n(i))$, $R_n = \sqrt{\text{Im}(M_n(i))}$. Тогда тройка

$$\Pi = \bigoplus_{n=1}^{\infty} \tilde{\Pi}_n = \bigoplus_{n=1}^{\infty} \{H_n, \tilde{\Gamma}_{0n}, \tilde{\Gamma}_{1n}\}, \quad \tilde{\Gamma}_{0n} = R_n \Gamma_{0n}, \quad \tilde{\Gamma}_{1n} = R_n^{-1} (\Gamma_{1n} - Q_n \Gamma_{0n})$$

будет граничной тройкой для C^* .

Явный вид рассматриваемой модели

Мы будем рассматривать оператор Дирака, определенный в виде:

$$Df = -ic \frac{d}{dx} \otimes \sigma_1 f + \frac{c^2}{2} \otimes \sigma_3 f,$$

$$\text{dom} D = \left\{ f \in W^{1,2}(\Lambda, C^2) : f(a) = f(b) = 0 \right\},$$

где $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ и $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

За T обозначим оператор бозонов и введем его по следующим правилам:

$$T\vec{\xi} = \{k\xi_k\}_{k=0}^{\infty}, \quad \text{dom} T = \left\{ \{\xi_k\}_{k=0}^{\infty} \in l_2 : \{k\xi_k\}_{k=0}^{\infty} \in l_2 \right\}.$$

Тогда в качестве рассматриваемого оператора, не вдаваясь в технические детали, будет выступать оператор $S = D \otimes I + I \otimes T$. Именно с ним мы и будем работать. Он – основа нашей модели.

Построение гамма-поля и функции Вейля. Матрица рассеяния

Без подробных пояснений отметим, что граничная тройка для оператора Дирака будет выглядеть, как [16]:

$$\Gamma_0^D \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} f_1(a) + f_1(b) \\ f_1(a) - f_1(b) \end{pmatrix}, \quad \Gamma_1^D \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} f_2(a) - f_2(b) \\ f_2(a) + f_2(b) \end{pmatrix}, \quad \Pi_D = \{H^D, \Gamma_0^D, \Gamma_1^D\}.$$

Запишем гамма-поле для оператора Дирака:

$$\gamma_D(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \frac{\cos(k(z)(x-v))}{\cos(k(z)d)} & \frac{\sin(k(z)(x-v))}{\sin(k(z)d)} \\ ik_1(z) \frac{\sin(k(z)(x-v))}{\cos(k(z)d)} & ik_1(z) \frac{\cos(k(z)(x-v))}{\sin(k(z)d)} \end{pmatrix},$$

где $k(z) = \frac{1}{c} \sqrt{z^2 - \frac{c^4}{4}}$, $k_1(z) = \frac{ck(z)}{z + \frac{c^2}{2}}$.

Построим функцию Вейля, которая имеет вид:

$$M_D(z) = \begin{pmatrix} m_1^D(z) & 0 \\ 0 & m_2^D(z) \end{pmatrix},$$

где $m_1^D(z) = ck_1(z) \tan(k(z)d)$, $m_2^D(z) = -ck_1(z) \cot(k(z)d)$.

Для построения граничной тройки, гамма-поля и функции Вейля исследуемого оператора, применим новую разработанную технику. В качестве итога, приведем только функцию Вейля [16]:

$$M(z) = \begin{pmatrix} m_1^D(z-T) & 0 \\ 0 & m_2^D(z-T) \end{pmatrix}.$$

Области применения

С точки зрения физики, результаты интересны тем, что изучены всевозможные свойства довольно простой, наглядной, но встречающейся в реальности модели взаимодействия двух физических систем.

Для математиков интересно обобщение ранее полученных результатов, касающихся суммы тензорных произведений операторов, на случай неограниченного оператора. В то же время построена строгая математическая модель, допускающая множество обобщений и применений в смежных физических задачах. Ранее такие построения строго проведены не были, и все результаты были получены физиками лишь эмпирически.

Публикации

1. *Boitsev A.A., Neidhardt H., Popov I.Y.* Weyl function for sum of operators tensor product // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013. Vol. 4. No 6. P. 747–759.
2. *Boitsev A.A.* Boundary triplets approach for Dirac operator // *Mathematical Results in Quantum Mechanics: Proceedings of the QMath12 Conference*. 2014. P. 213–220.
3. *Бойцев А.А., Попов И.Ю., Нейдхард Х.* Расширение тензорного произведения операторов на примере оператора Дирака // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. Т. 14. № 4. С. 164–169.
4. *Boitsev A.A., Neidhardt H, Popov I.Y.* Dirac operator coupled to bosons // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2016. Vol. 7. No 2. P. 332–339.

Литература

1. *Pan L. et al.* Electron dwell time through a quantum wire under an electromagnetic field irradiation // *Physics Letters A*. 2007. Vol. 368. No 1–2. P. 97–100.
2. *Popov I.Y.* Operator extensions theory model for electromagnetic field-electron interaction // *Journal of Mathematical Physics*. 2012. Vol. 53. P. 063505
3. *Smudgen K.* Unbounded self-adjoint operators on Hilbert space. Vol. 265. 2012. – 432 p.

4. *Derkach V.A., Malamud M.M.* On the Weyl function and Hermite operators with lacunae // *Doklady Akademii Nauk USSR*. 1987. No 5. P. 1041–1046.
5. *Derkach V.A., Malamud M.M.* Generalized resolvents and the boundary value problems for Hermitian operators with gaps // *Journal of Functional Analysis*. 1991. Vol. 95. No 1. P. 1–95.
6. *Derkach V.A., Malamud M.M.* The extension theory of Hermitian operators and the moment problem // *Journal of Mathematical Sciences*. 1995. Vol. 73. No 2. P. 141–242.
7. *Gorbachuk V.I., Gorbachuk M.L.* Boundary value problems for operator differential equations. Vol. 48. 1991. – 347 p.
8. *Malamud M.M.* Some classes of extensions of a Hermitian operator with lacunae // *Ukrainian Mathematical Journal*. 1992. Vol. 44. No 2. P. 215–233.
9. *Malamud M.M., Neidhardt H.* Sturm-liouville boundary value problems with operator potentials and unitary equivalence // *Journal of Differential Equations*. 2012. Vol. 252. No 11. P. 5875–5922.
10. *Malamud M.M., Malamud S.M.* Spectral theory of operator measures in a Hilbert space // *Algebra and analysis*. 2003. Vol. 15. No 3. P. 1–77.
11. *Gorbachuk M.L.* Self-adjoint boundary problems for a second-order differential equation with unbounded operator coefficient // *Functional Analysis and Its Applications*. 1971. Vol. 5. No 1. P. 10–21.
12. *Malamud M.M., Neidhardt H.* On the Kato – Rosenblum and the Weyl – Neumann theorems // *Doklady Akademii Nauk USSR*. 2010. No 2. P. 162–166.
13. *Boitsev A.A. et al.* Weyl function for sum of operators tensor product // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013. Vol. 4. No 6. P. 747–759.
14. *Boitsev A.A.* Boundary triplets approach for Dirac operator // *Mathematical Results in Quantum Mechanics: Proceedings of the QMath12 Conference*. 2014. P. 213–220.
15. *Бойцев А.А. и др.* Расширение тензорного произведения операторов на примере оператора Дирака // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2014. Т. 14. № 4. С. 164–169.
16. *Boitsev A.A. et al.* Dirac operator coupled to bosons // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2016. Vol. 7. No 2. P. 332–339.
17. *Baumgartel H., Wollenberg M.* *Mathematical scattering theory*. Vol. 9. 1983. – 449 p.



Буздалова Арина Сергеевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: abuzdalova@gmail.com

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ
ОПТИМИЗАЦИИ В ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМАХ, СОХРАНЯЮЩЕГО
ОСОБЬ С ЛУЧШИМ ЗНАЧЕНИЕМ ЦЕЛЕВОГО КРИТЕРИЯ**

А.С. Буздалова

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Существуют практически значимые задачи оптимизации, в которых информация о градиенте оптимизируемой функции недоступна, в частности задачи дискретной

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

оптимизации. К ним относятся, например, задачи комбинаторной оптимизации (построение расписаний), а также задачи поисковой инженерии программного обеспечения, где требуется оптимизировать программы или входные данные для них. Точные алгоритмы решения многих из этих задач являются неэффективными по времени выполнения. Оно достаточно велико для их применения в практических приложениях. Для некоторых классов задач таких алгоритмов доказуемо не существует [1]. Можно использовать эволюционные алгоритмы [2], позволяющие получать решения приемлемого качества

Известно, что в некоторых случаях можно повысить эффективность эволюционного алгоритма, оптимизирующего целевой критерий, если использовать вспомогательные критерии [3]. При этом предлагается либо оптимизировать одновременно все критерии [4], либо выбирать критерий на каждом этапе оптимизации случайным образом [5]. Эти методы обладают рядом недостатков: первый подход работает слишком медленно на задачах с большим числом критериев или большим временем их вычисления; второй – не учитывает возможных особенностей задачи, которые можно было бы использовать для более эффективного выбора критериев.

Помимо описанных выше методов выбора вспомогательных критериев, существует также метод *SaRA* [6], последовательно перебирающий все имеющиеся критерии в течение одного запуска алгоритма оптимизации. Доказано, что в случае, когда оптимизация хотя бы одного вспомогательного критерия приводит к оптимизации целевого критерия, *SaRA* позволяет провести оптимизацию целевого критерия за асимптотически оптимальное время, то есть за асимптотически минимальное время, необходимое для оптимизации целевого критерия с помощью одного из имеющихся. Будем называть такой критерий постоянно эффективным. Однако в случае, когда для оптимизации целевого критерия не достаточно произвести оптимизацию какого-либо одного вспомогательного критерия, а необходимо переключаться между ними в определенной последовательности, эффективность этого алгоритма снижается. Кроме того, метод *SaRA* не способен снизить воздействие мешающих критериев, то есть критериев, оптимизация которых замедляет оптимизацию целевого критерия.

Способностью игнорировать мешающие критерии, а также переключаться между различными критериями на разных этапах оптимизации обладает основанный на обучении с подкреплением [7–9] метод *EA+RL*, ранее предложенный автором настоящей работы [10]. Однако по эффективности он уступает методу *SaRA* в случае, когда в наборе вспомогательных критериев имеется такой, оптимизация которого приводит к оптимизации целевого критерия за асимптотически оптимальное время.

Целью исследования является разработка нового алгоритма выбора вспомогательных критериев, сохраняющего особь с лучшим значением целевого критерия. Оценить его эффективность предлагается путем решения следующих модельных задач.

- Задача оптимизации критерия *LeadingOnes* со вспомогательным критерием *OneMax*. Асимптотическое время решения задачи *LeadingOnes* с помощью метода спуска со случайными мутациями составляет $O(n^2)$, в то время как решение задачи оптимизации критерия *OneMax* может быть получено за $O(n \log n)$ [11]. Оптимум *OneMax* совпадает с оптимумом *LeadingOnes*. Таким образом, *OneMax* является постоянно эффективным вспомогательным критерием оптимизации для *LeadingOnes*. Предлагаемый метод должен решать эту задачу за меньшее время, чем при ее решении стандартными методами без вспомогательных критериев.

- Задача оптимизации критерия *XdivK* со вспомогательными критериями $\min(x, c)$ и $\max(x, c)$ [12, 13], где x – число единиц в особи, c – точка переключения критериев. Здесь на разных этапах оптимизации выгодны разные вспомогательные критерии. Предлагаемый метод должен выбирать правильные критерии на соответствующих этапах оптимизации и решать задачу оптимизации *XdivK* за время, меньшее, чем время работы метода *SaRA*.

• Задача оптимизации критерия *OneMax* с мешающим критерием *ZeroMax*. Предлагаемый метод должен игнорировать мешающий критерий. Следует рассмотреть случай использования ненулевой вероятности исследования среды обучения с подкреплением.

В предлагаемом методе реализована специальная схема отбора особей для нового поколения эволюционного алгоритма. Согласно ей, сначала выбирается особь с лучшим значением целевого критерия. Выбор из оставшихся особей производится с использованием вспомогательного критерия, определяемого с помощью алгоритма обучения с подкреплением *Q-learning* [9]. Таким образом, поколение эволюционного алгоритма состоит из двух особей: одна из них с лучшим текущим значением целевого критерия, а вторая выбрана с использованием вспомогательного критерия.

Вознаграждение вычисляется как разность суммарного значения целевого критерия, полученного на особях поколения, между двумя последовательными поколениями. В настоящей работе считается, что эволюционный алгоритм всегда находится в единственном состоянии. Ниже представлен псевдокод разработанного метода.

Установить номер текущего поколения: $i \leftarrow 0$;

Сгенерировать начальное поколение G_0 ;

ПОКА (условие останова не выполнено)

 Вычислить состояние s_i и передать его модулю обучения;

 Получить критерий для следующего поколения h_{i+1} из модуля обучения;

 Применить мутацию к особям текущего поколения G_i ;

 Включить в следующее поколение G_{i+1} особь с лучшим значением целевого критерия среди родительских особей и особей-потомков;

 Из оставшихся особей выбрать ту, у которой лучшее значение критерия h_{i+1} и также включить ее в поколение G_{i+1} ;

 Вычислить вознаграждение $r(s_i, h_{i+1})$ и передать его модулю обучения;

 Обновить номер текущего поколения: $i \leftarrow i+1$;

КОНЕЦ ЦИКЛА

В ранее предложенном методе *EA+RL* особи с высоким значением целевого критерия могли быть исключены из текущего поколения в случае выбора неэффективного целевого критерия. В предложенном в настоящей работе методе данный недостаток устранен за счет сохранения особи с лучшим значением целевого критерия. Таким образом, предложенный метод должен снижать отрицательное влияние неэффективных критериев.

В ходе эксперимента предложенный метод сравнивался с методами *EA+RL*, *SaRA* и с методом спуска со случайными мутациями, не использующим вспомогательные критерии. Вероятность мутации во всех случаях составляла $1/n$, где n — длина особи.

Эффективность алгоритмов измерялась по числу вычислений функции приспособленности, необходимых для нахождения оптимального значения целевого критерия. Чем меньше вычислений необходимо произвести, тем эффективнее алгоритм. Для получения среднего числа вычислений функции приспособленности каждый алгоритм запускался 100 раз на каждой модельной задаче, затем результаты усреднялись. Алгоритм останавливался при условии, что был найден оптимум целевого критерия, или при превышении максимально допустимого числа вычислений функции приспособленности, составлявшего 100 000 вычислений. В качестве параметра обучения с подкреплением использовалась скорость обучения $\alpha = 0,5$. В задачах *LeadingOnes* и *XdivK* использовалась жадная стратегия ($\varepsilon = 0$), в задаче *OneMax* в соответствии с заданием была протестирована эпсилон-жадная стратегия при $\varepsilon = 0,1$. Уровень статистической значимости выбран $p=0,05$ [14].

Далее представлены результаты запусков сравниваемых алгоритмов на модельных задачах. Их эффективность оценивается как среднее число вычислений функции приспособленности, необходимое для нахождения оптимума целевого критерия. В случаях,

когда алгоритм превышает максимально допустимое число вычислений, в таблицах ставится прочерк. Результаты решения задачи оптимизации критерия *LeadingOnes* со вспомогательным критерием *OneMax* представлены в Табл. 1. Можно видеть, что предложенный метод находит оптимум целевого критерия за значительно меньшее число вычислений функции приспособленности, чем метод спуска без вспомогательных критериев. Заметим также, что с ростом длины особи разработанный метод становится эффективнее метода *EA+RL*, что свидетельствует о лучшей асимптотике времени его работы по сравнению с *EA+RL*.

Таблица 1

Среднее число поколений, необходимое для решения задачи *LeadingOnes* со вспомогательным критерием *OneMax*

Длина особи	Новый метод	EA+RL	SaRA	Метод спуска
100	3678,02	812,48	1965,28	5099,06
200	13610,38	10823,57	4708,97	20215,99
300	15238,76	22177,20	8028,28	45094,10
400	55186,50	-	11992,17	80296,02

Таблица 2

Среднее число поколений, необходимое для решения задачи *XdivK* с переключающимися вспомогательными критериями

Длина особи	Делитель k	Новый метод	EA+RL	SaRA	Метод спуска
10	2	81,06	709,99	175,54	81,54
20	2	290,56	-	603,35	336,50
30	3	2469,70	-	2467,96	4453,55
40	4	32928,62	-	3741,58	-

В Табл. 2 представлены результаты решения задачи *XdivK* с переключающимися вспомогательными критериями. Как и требовалось, разработанный метод в большинстве случаев позволяет найти оптимум целевого критерия быстрее, чем метод *SaRA*. Можно также видеть, что с ростом длины особи он оказывается значительно эффективнее метода спуска со случайными мутациями. Отметим, что метод *EA+RL* в большинстве случаев не справляется с решением данной задачи.

Таблица 3

Среднее число поколений, необходимое для решения задачи *OneMax* с мешающим вспомогательным критерием *ZeroMax*

Длина особи	Новый метод	EA+RL	SaRA	Метод спуска
100	899,50	-	1871,49	512,39
200	2042,80	-	4605,23	1170,45
300	3309,14	-	7144,07	1842,34
400	4559,70	-	10290,24	2644,12

В Табл. 3 представлены результаты решения задачи *OneMax* с мешающим критерием *ZeroMax*. Рассмотрено использование эpsilon-жадной стратегии с вероятностью

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

исследования среды обучения $\varepsilon = 0,1$. Можно видеть, что предложенный метод достаточно эффективно игнорирует мешающий критерий. Это подтверждается тем, что среднее число вычислений, необходимое ему, сравнимо со средним числом вычислений метода спуска, в котором мешающий критерий не используется. Отметим, что метод *EA+RL* не справляется с решением данной задачи ни для одной из рассмотренных длин особи. При этом предложенный метод не только находит оптимум во всех случаях, но и делает это более чем в два раза быстрее, чем метод *SaRA*.

Заключение

Разработан алгоритм выбора вспомогательных критериев оптимизации во время работы эволюционного алгоритма, сохраняющий особь с лучшим значением целевого критерия. Выполнено сравнение разработанного метода с методами *EA+RL*, *SaRA* и методом без вспомогательных критериев. Рассмотрены модельные задачи оптимизации критерия *LeadingOnes* со вспомогательным критерием *OneMax*, *XdivK* с переключающимися вспомогательными критериями и *OneMax* с мешающим критерием *ZeroMax*. Предложенный алгоритм позволил достаточно эффективно решить все рассмотренные задачи, в отличие от других методов, которые в ряде случаев не находили оптимум целевого критерия либо требовали значительно большего числа вычислений функции приспособленности, как метод *SaRA* в задаче *OneMax* с мешающим критерием *ZeroMax*. Таким образом, требования, которые предъявлялись к разрабатываемому методу, выполнены.

Разработанный алгоритм может быть использован для повышения эффективности решения задач оптимизации с помощью эволюционных алгоритмов. Предполагается, что постановки этих задач уже содержат или позволяют легко составить набор вспомогательных функций приспособленности. Такая ситуация возникает, например, во время автоматической генерации тестов для олимпиадных задач [15]. Также многие задачи, интересные как с точки зрения теории оптимизации, так и с практической точки зрения, обладают аддитивным целевым критерием, что позволяет получить вспомогательные критерии, представив целевой как сумму вспомогательных. К таким задачам относятся, например задача коммивояжера [4], календарного планирования (*job shop scheduling problem*) [5], задача о рюкзаке [16], являющиеся NP-полными. Эффективность решений этих задач, основанных на применении эволюционных алгоритмов, может быть повышена с помощью разработанного метода.

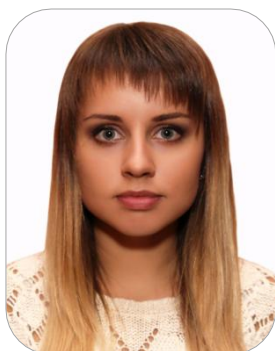
Публикации

1. Petrova I.A., Buzdalova A.S., Korneev G.A. Runtime analysis of random local search with reinforcement based selection of non-stationary auxiliary objectives: initial study // Proceedings of MENDEL 2016 Conference. 2016. P. 95–102.
2. Buzdalov M.V., Buzdalova A.S. Adaptive selection of helper-objectives for test case generation // IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2013. P. 2245–2250.
3. Buzdalov M.V., Buzdalova A.S. OneMax helps optimizing XdivK: theoretical runtime analysis for RLS and EA+RL // Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. 2014. P. 201–202.
4. Buzdalova A.S., Buzdalov M.V. Increasing efficiency of evolutionary algorithms by choosing between auxiliary fitness functions with reinforcement learning // Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Applications. Vol. 1. 2012. P. 150–155.

Литература

1. Luke S. Essentials of Metaheuristics [Электронный ресурс]. URL: <http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics> (дата обращения 21.06.2012).
2. Eiben A.E. et al. Introduction to Evolutionary Computing. Springer, 2003. – 300 p.

3. *Neumann F., Wegener I.* Can single-objective optimization profit from multiobjective optimization? // *Multiobjective Problem Solving from Nature. Part 1.* 2008. P. 115–130.
4. *Knowles J.D. et al.* Reducing local optima in single-objective problems by multi-objectivization // *Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization.* 2001. P. 269–283.
5. *Jensen M.T.* Helper-objectives: using multi-objective evolutionary algorithms for single-objective optimisation // *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms.* 2005. Vol. 3. No 4. P. 323–347.
6. *Buzdalov M.V.* A switch-and-restart algorithm with exponential restart strategy for objective selection and its runtime analysis // *13th International Conference on Machine Learning and Applications.* Vol. 1. 2014. P. 141–146.
7. *Gosavi A.* Reinforcement learning: a tutorial survey and recent advances // *INFORMS Journal on Computing.* 2009. Vol. 21. No 2. P. 178–192.
8. *Kaelbling L.P. et al.* Reinforcement learning: a survey // *Journal of Artificial Intelligence Research.* 1996. Vol. 4. P. 237–285.
9. *Sutton R.S., Barto A.G.* Reinforcement learning: an introduction. Cambridge, 1998. – 322 p.
10. *Buzdalova A.S., Buzdalov M.V.* Increasing efficiency of evolutionary algorithms by choosing between auxiliary fitness functions with reinforcement learning // *Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Applications.* Vol. 1. 2012. P. 150–155.
11. *Oliveto P.S. et al.* Time complexity of evolutionary algorithms for combinatorial optimization: a decade of results // *International Journal of Automation and Computing.* 2007. Vol. 4. No 3. P. 281–293.
12. *Afanasyeva A.S., Buzdalov M.V.* Choosing best fitness function with reinforcement learning // *10th International Conference on Machine Learning and Applications and Workshops.* Vol. 2. 2011. P. 354–357.
13. *Knowles J.D. et al.* Reducing local optima in single-objective problems by multi-objectivization // *Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization.* 2001. P. 269–283.
14. *Derrac J. et al.* A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms // *Swarm and Evolutionary Computation.* 2011. Vol. 1. No 1. P. 3–18.
15. *Buzdalov M.V., Buzdalova A.S.* Adaptive selection of helper-objectives for test case generation // *IEEE Congress on Evolutionary Computation.* 2013. P. 2245–2250.
16. *Pisinger D.* Algorithms for knapsack problems: PhD thesis. Copenhagen. 1995. – 199 p.



Володина Анастасия Андреевна
Факультет информационной безопасности и компьютерных технологий
Кафедра мониторинга и прогнозирования информационных угроз
E-mail: nasti.vol@gmail.com

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ПОДХОДА К ОТРАЖЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ УГРОЗ В ГОСУДАРСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А.А. Володина

Научный руководитель – профессор И.М. Левкин

Цель проекта – разработка адаптивного подхода к отражению информационных угроз в государственных информационных системах, который позволит:

- адекватно поддерживать организацию системы комплексной защиты информации больших информационных систем в каждый момент времени;
- проводить реконструкцию системы комплексной защиты информации больших информационных систем всякий раз, когда возникает потребность в реорганизации процесса защиты информации;
- проводить реконструкцию быстро и с минимальными затратами.

Отражение информационных угроз элементами системы защиты информации

Представим процесс отражения информационной угрозы на элемент информационной системы предприятия (организации, фирмы) в виде агрегированной операционно-временной модели [1] (рис. 1).

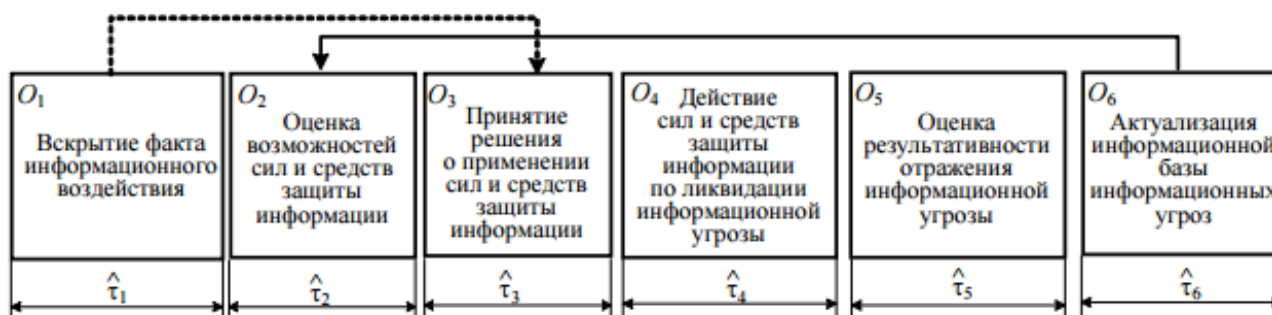


Рис. 1. Агрегированная операционно-временная модель

В соответствии с этой моделью на начальном этапе функционирования система мониторинга информационных угроз должна обнаруживать информационные признаки воздействия на информационную систему. На идентификацию этого воздействия (операция O_1) может быть затрачено время $\hat{\tau}_1$. Продолжительность операции O_1 зависит от многих случайных факторов: числа и номенклатуры вскрытых информационных признаков, квалификации специалистов защиты информации, условий обработки информации и т. д. Поэтому время $\hat{\tau}_1$ является случайной величиной ($\hat{}$ – знак случайной величины). Если информационная угроза известна, то в дальнейшем осуществляется непосредственное принятие решения о применении сил и средств защиты информации (операция O_3). Продолжительность выполнения этой операции – $\hat{\tau}_3$.

Если информационная угроза неизвестна, то возникает необходимость оценить возможность ее предотвращения имеющимися в наличии силами и средствами защиты информации (операция O_2) [2]. Продолжительность выполнения этой операции $\hat{\tau}_2$ зависит от степени новизны предполагаемой информационной угрозы. При этом в системе защиты информации объекта может не оказаться эффективных сил и средств противодействия новой информационной угрозе. В этом случае возникает необходимость в поиске и приобретении дополнительных сил и средств защиты информации и далее в принятии решения об их применении.

Действия сил и средств защиты информации по ликвидации информационной угрозы (операция O_4) в случае известной угрозы осуществляются автоматически и занимают непродолжительное время $\hat{\tau}_4$. Если угроза неизвестна, то продолжительность $\hat{\tau}_4$ может быть существенно увеличена.

Оценка результативности отражения информационной угрозы (операция O_5 продолжительностью $\hat{\tau}_5$) предполагает:

- оценку способности существующих сил и средств защиты информации эффективно отражать различные информационные угрозы, в том числе в условиях их модернизации;
- выявление особенностей модифицированных и вновь появившихся информационных угроз;
- изучение возможностей перспективных сил и средств защиты информации.

Актуализация информационной базы (операция O_6 продолжительностью $\hat{\tau}_6$) представляет собой накопление информации по различным видам информационных угроз с целью информационного обеспечения процесса защиты соответствующей информационной структуры. От степени полноты этой базы зависит продолжительность выполнения операций вскрытия факта информационного воздействия, оценки возможностей сил и средств защиты информации и принятия решения об их применении [3, 4].

Эффективность процесса отражения информационных угроз в рассматриваемом случае может быть оценена вероятностью достижения цели – ликвидации угрозы информационной структуры объекта:

$$P_{\text{ДЦ}}(t) = P\left[(\hat{v} \geq v^*) \cap (\hat{r} \leq r^*) \cap (\hat{\tau} \leq \tau^*)\right] = \int \int \int_{v, r, \tau} \varphi_{\langle \hat{v}, \hat{r}, \hat{\tau} \rangle}(v, r, \tau) \delta v \delta r \delta \tau, \quad (1)$$

где \hat{v} – целевой эффект процесса функционирования системы защиты информации, заключающийся в обнаружении информационных признаков угрозы информационной структуре объекта; \hat{r} – ресурс сил и средств защиты информации; $\hat{\tau}$ – время, необходимое для ликвидации угрозы информационной структуре; $\varphi_{\langle \hat{v}, \hat{r}, \hat{\tau} \rangle}(v, r, \tau)$ – совместная плотность вероятности случайных величин \hat{v} , \hat{r} , и $\hat{\tau}$ [5].

В связи с тем, что в процессе ликвидации угрозы задействуются все возможные ресурсы сил и средств, выполнение требования $(\hat{r} \leq r^*)$ в выражении (1) может быть принято за достоверное и за счет использования эффекта поглощения исключено из дальнейшего рассмотрения. Тогда выражение (1) может быть представлено следующим образом:

$$P_{\text{ДЦ}}(t) = \int_0^{v^*} \varphi_{\langle \hat{v} \rangle}(v) \left[\int_0^{\tau^*} \varphi_{\langle \hat{\tau} / v \rangle}(\tau; v) d\tau \right] dv, \quad (2)$$

где $\varphi_{\langle \hat{v} \rangle}(v)$ – плотность вероятности случайной величины \hat{v} ; $\varphi_{\langle \hat{\tau} / v \rangle}(\tau; v)$ – условная плотность вероятности случайной величины $\hat{\tau}$ при заданном значении v случайной величины \hat{v} .

Для того чтобы найти аналитические выражения плотностей вероятностей, входящих в выражение (2), необходимо установить вид функции связности между переменными \hat{v} и $\hat{\tau}$. С этой целью проведем следующие рассуждения.

Пусть средства мониторинга угроз информационной структуре объекта обнаруживают информационный признак угрозы за время t с вероятностью $P(t)$, а за время δt с вероятностью $P(t, t + \delta t)$.

Чтобы быть обнаруженным за время $(t + \delta t)$, информационный признак угрозы должен быть выявлен либо за время t , либо за время от t до $(t + \delta t)$ (рис. 2).

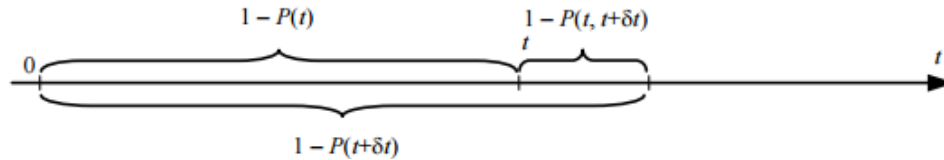


Рис. 2. Время обнаружения информационного признака угрозы

Поиск окончательного вида аналитической зависимости (2) предполагает установление вида плотностей распределения $\varphi_{\langle \hat{v} \rangle}(v)$ и $\varphi_{\langle \hat{\tau} / v \rangle}(\tau; v)$.

В соответствии с законом распределения монотонной функции от одного случайного аргумента можно записать:

$$\varphi_{\hat{v}}(v) = \varphi_{\hat{\tau}_1}[\tau_1(v)][\tau_1(v)]'; \quad (3)$$

где $[\tau_1(v)]'$ – производная функции $\tau_1(v)$, обратной функции $v(\tau_1)$.

$$\tau_1(v) = v^{-1}(\tau_1) = \hat{\tau}_3 - \frac{1}{\lambda} \ln(1 - v); \quad (4)$$

$$[\tau_1(v)]' = -\frac{1}{\lambda(1 - v)}. \quad (5)$$

В свою очередь, так как:

$$\hat{\tau} = \tau_1 + \hat{\tau}_3 = \tau_1 - \frac{1}{\lambda} \ln(1 - v) + \hat{\tau}_3,$$

то можно записать:

$$\varphi_{\hat{\tau}/\hat{v}}(\tau; v) = \varphi_{\hat{\tau}_1/v}(\tau; v) \otimes \varphi_{\hat{\tau}_3}(\tau) = \delta\left(\tau - \tau_1 - \frac{1}{\lambda} \ln(1 - v)\right) \otimes \phi_{\hat{\tau}_3}(\tau), \quad (6)$$

где \otimes – символ композиции законов распределения случайных величин.

Плотность вероятности случайных величин, характеризующих продолжительности операций, составляющих технологическую задержку, обычно моделируют нормальным законом распределения. В силу закона композиции нормальных плотностей вероятностей можно записать:

$$\varphi_{\hat{\tau}_3}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sum_{i=2}^6 \sigma_i^2}} e^{-\frac{(\tau - \sum_{i=2}^6 m_{\hat{\tau}_i})^2}{2 \sum_{i=2}^6 \sigma_i^2}}, \quad (7)$$

где $m_{\hat{\tau}_i}$ – математическое ожидание случайной величины $\hat{\tau}_i$, $i = \overline{2, 6}$, характеризующей продолжительность выполнения операций O_2 – O_6 ; $\sigma_{\hat{\tau}_i}$ – дисперсия этих случайных величин.

Результаты интегрирования выражения (2) с учетом выражений (3–7) при помощи пакета прикладных программ *MATLAB 7* приведены на рис. 3. Расчеты проводились при следующих исходных данных: $\lambda = 1$ обнаружений в час; $m_{\hat{\tau}_2} = 0,01$ час; $\sigma_{\hat{\tau}_2} = 0,002$ час; $m_{\hat{\tau}_3} = 0,03$ час; $\sigma_{\hat{\tau}_3} = 0,008$ час; $m_{\hat{\tau}_4} = 0,1$ час; $\sigma_{\hat{\tau}_4} = 0,03$ час; $m_{\hat{\tau}_5} = 0,225$ час; $\sigma_{\hat{\tau}_5} = 0,062$ час; $m_{\hat{\tau}_6} = 0,3$ час; $\sigma_{\hat{\tau}_6} = 0,09$ час. При этом сдвиг зависимостей $P_{дц}(t)$ по оси t на величину $\sum_{i=2}^6 m_{\tau_i} = 0,6$ час не показан [6].

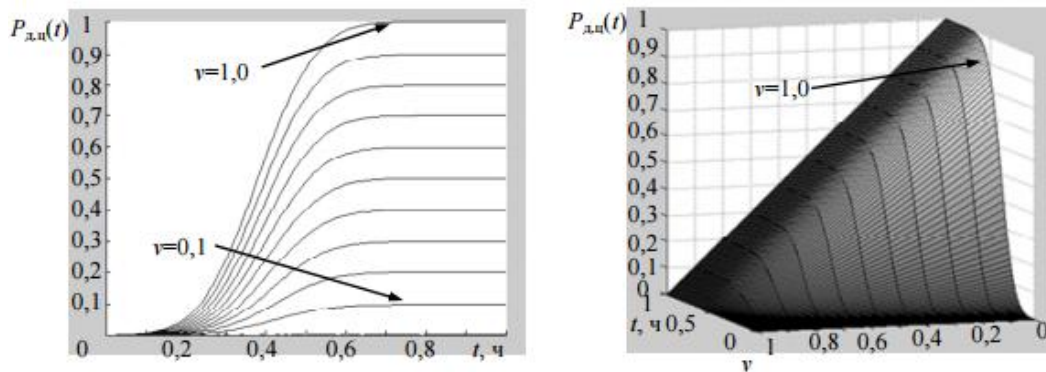


Рис. 3. Результаты интегрирования выражения (2)

На рис. 4 представлена операционно-временная модель процесса отражения новой угрозы элементами государственной информационной системы, система защиты информации которой построена по адаптивной схеме.

i — элемент ГИС; первый элемент, зафиксировавший новую угрозу



g — элемент ГИС

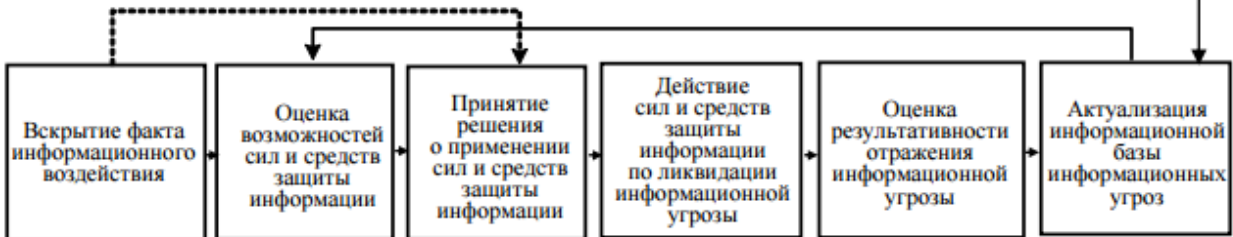


Рис. 4. Операционно-временная модель процесса отражения новой угрозы элементами государственной информационной системы

Адаптивный подход к отражению информационных угроз в государственных информационных системах (ГИС)

Согласно приведенной схеме (рис. 4), в элементе, подвергнувшемся новому информационному воздействию, осуществляется адаптивная перестройка структуры системы защиты информации в зависимости от характера этого воздействия. Одновременно информация о характере новой информационной угрозы и вариантах перестроения

структуры системы защиты информации поступает в информационные базы информационных угроз всех остальных элементов ГИС (аккумулируется в соответствующих репозиториях). На основании полученной информации принимается решение о возможном изменении структуры соответствующего элемента большой информационной системы в зависимости от наличия соответствующих сил и средств на ее осуществление. В случае возникновения предпосылок к аналогичной угрозе осуществляется оперативное изменение структуры комплексной системы защиты информации соответствующего элемента.

Это позволяет:

- увеличить интенсивность обнаружения информационных признаков новых угроз λ за счет организации их целенаправленного поиска в информационном пространстве (сокращения пространства поиска);
- уменьшить параметры законов распределения случайных величин $\hat{\tau}_2$ и $\hat{\tau}_3$.

Таким образом, в зависимости от степени изменения параметров λ , $m_{\hat{\tau}_2}$, $\sigma_{\hat{\tau}_2}$, $m_{\hat{\tau}_3}$ и $\sigma_{\hat{\tau}_3}$ в соответствующей степени будет повышена эффективность системы защиты информации ГИС в целом.

Заключение

В ходе выполнения работы:

- проведен аналитический обзор ГИС;
- рассмотрены возможные информационные воздействия на ГИС;
- построены операционно-временные модели;
- проведена оценка результативности отражения информационной угрозы;
- представлен адаптивный подход к отражению информационных угроз в ГИС.

Публикации

1. Левкин И.М., Володина А.А. Агрегированная операционно-временная модель оценивания эффективности отражения информационных угроз в больших информационных системах // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 5. С. 335–341.
2. Kostin A.O., Volodina A.A., Trifonov A.A., Ivanova E.A., Liapustin A.E. Evaluation efficiently the process of reflection information threats in large information systems // 3rd International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts (SGEM 2016). Book 2. Vol. 2. Vienna, 2016. P. 345–353.
3. Володина А.А. Особенности отражения информационных угроз в больших информационных системах // In Situ. 2016. № 4. С. 23–26.
4. Володина А.А., Костин А.О. Особенности защиты информации в больших информационных системах [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2549/2549.pdf> (дата обращения: 15.09.16).
5. Безрук Г.Г., Володина А.А. Адаптация в информационных системах по нескольким параметрам // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015). IX Санкт-Петербургская межрегиональная конференция: материалы конференции. СПб., 2015. С. 15–17.

Литература

1. Mesarovic M.D., Takahara Y. General systems theory: mathematical foundations. Academic Press, 1975. – 268p.
2. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of a real-time redundant computational process in cluster architecture systems // Automatic Control and Computer Science. 2015. Vol. 49. No 1. P. 46–56.

3. *Stephan C.I. et al.* Using Laboratory Information Management Systems as central part of a proteomics data workflow // *Proteomics*. 2010. Vol. 10. No 6. P. 1230–1249.
4. *Петухов Г.П., Якунин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М., 2006. – 504 с.
5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учебник для вузов. 6-е изд. М., 1999. – 576 с.
6. *Ануфриев И.Е. и др.* MATLAB 7. СПб., 2005. – 1104 с.



Воронов Александр Сергеевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра информационно-навигационных систем
E-mail: al.s.voronov@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ЛАГА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

А.С. Воронов

Научный руководитель – профессор М.И. Евстифеев

Цель работы – создание датчика индукционного лага повышенной прочности, способного безотказно функционировать при глубоководных работах подводных аппаратов, например исследовательских батискафов [1–3].

Принцип работы индукционного датчика, обязательного прибора на судне [4], основан на явлении электромагнитной индукции [5]. Согласно этому принципу при перемещении проводника в магнитном поле в нем индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения судна. В связи с этим обязательными конструктивными элементами датчика являются катушки индуктивности и электрические контакты, воспринимающие ЭДС с забортной воды, являющейся проводником. Для герметизации электроники и контактов в датчике используется заливочный изоляционный материал, например компаунд.

Для анализа возможности применения датчика лага при глубоководных работах в пакете прикладных программ *ANSYS Workbench* построена конечно-элементная модель (рис. 1). Расчеты проводились в модуле *static structural*, в котором на все внешние поверхности задавалась нагрузка, имитирующая гидростатическое давление забортной воды. Количество конечных элементов в модели составило примерно 1,1 млн. Вблизи критических областей была произведена трансформация сетки и ее измельчение. Для уменьшения времени расчета задача решалась в симметричной постановке (симметрия вдоль продольной оси). Физические свойства материалов (модуль упругости, удельный вес, пределы прочности и прочие) были заданы непосредственно в трехмерных моделях деталей. При расчетах все материалы приняты изотропными. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Здесь и далее на цветовой палитре представлено распределение эквивалентных напряжений (*Equivalent (von-Mises) Stress*), которые более предпочтительны для текущего анализа, так как имеет место сложнонапряженное нагружение (происходит объемное сжатие компаунда), и определяются по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

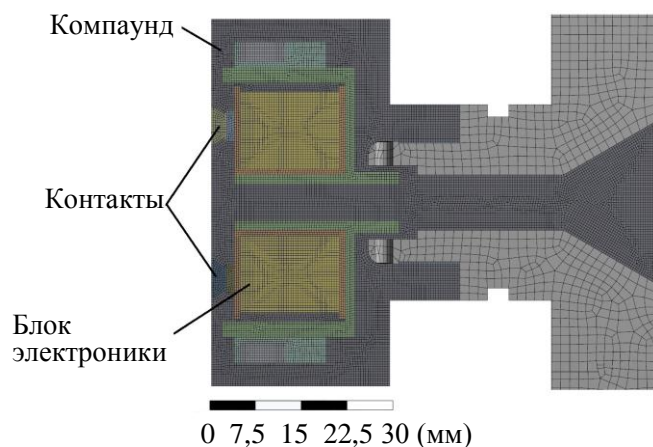


Рис. 1. Расчетная модель прибора

Наибольшие напряжения и деформации возникают на наружной поверхности компаунда в области контактов и вблизи блока электроники, что соответствует результатам испытаний.

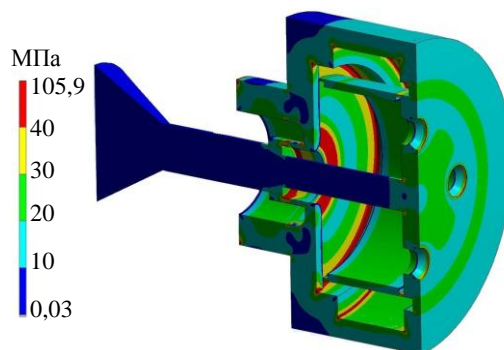


Рис. 2. Распределение напряжений в компаунде

В процессе моделирования выявлено, что применение корпуса и армирование позволяют перераспределить возникающие в приборе напряжения. Часть нагрузки снимается с компаунда и воспринимается армирующим элементом и корпусом. В этом случае максимальные напряжения в компаунде, очевидно, уменьшаются. Схематично конструкция датчика с корпусом и армирующим элементом изображена на рис. 3. На рис. 4 показаны распределения напряжений в компаунде корпусного исполнения датчика с применением армирования. По результатам моделирования оказалось, что введение защитного корпуса и армирующего элемента, снизили максимальные напряжения примерно на 43 %.

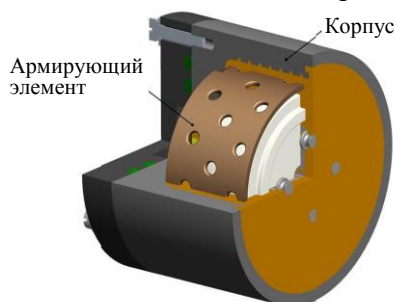


Рис. 3. Корпусное исполнение армированного датчика

Оптимизация конструктивных элементов

Введение новых конструктивных элементов в индукционный датчик, таких как армирующий элемент и корпус, потребовало проведение дополнительного анализа с целью оптимизации их конструктивных параметров по критерию повышения прочности. Для этого была построена дополнительная математическая модель, проведен поиск оптимальных

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

соотношений толщины слоя компаунда над армирующим элементом и его радиуса (рис. 5). Размеры корпуса не изменялись для сохранения габаритных размеров датчика.

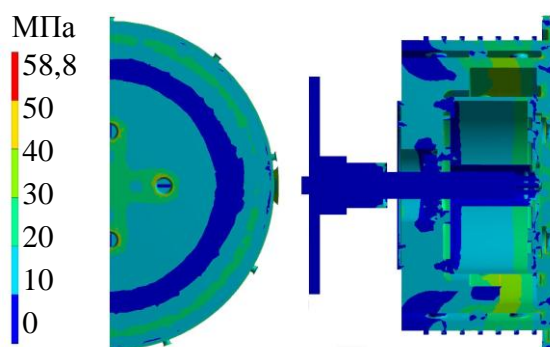


Рис. 4. Распределение напряжений в компаунде в предлагаемой конструкции датчика

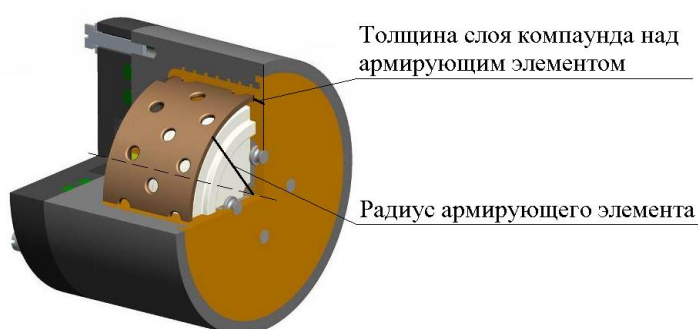


Рис. 5. Исследуемые конструктивные параметры датчика

В ходе расчетов толщина слоя компаунда над армирующим элементом варьировалась от 1 до 6 мм с шагом 0,25 мм, Радиус армирующего элемента изменялся от 27 до 30 мм с шагом 0,2 мм. Указанные пределы размеров армирующего элемента не влияют на габаритные размеры датчика, что позволяет применять модернизированный датчик вместо прежнего без изменения места его установки.

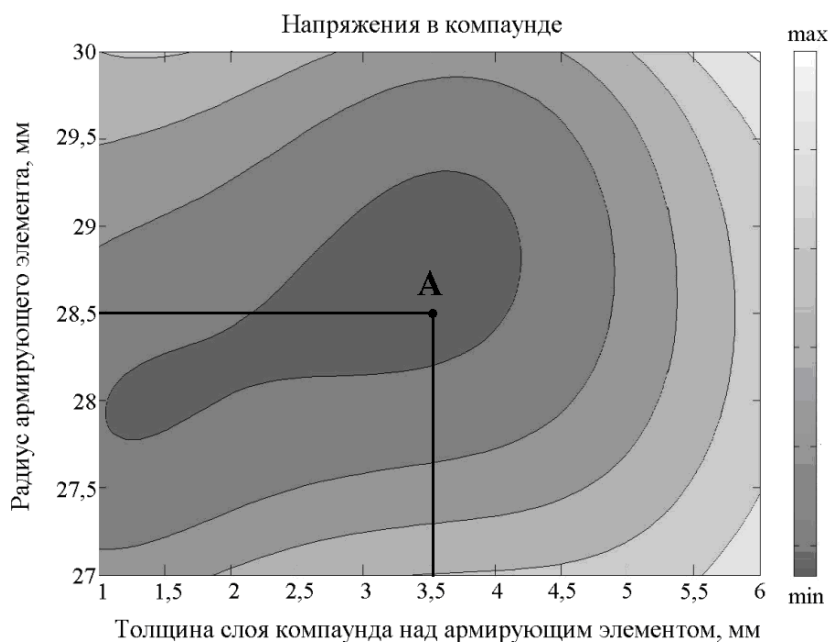


Рис. 6. Поиск оптимальных размеров армирующего элемента

При анализе было получено распределение максимальных напряжений, возникающих в компаунде датчика. Полученные результаты были аппроксимированы полиномом пятой степени в пакете *Matlab*. На рис. 6 изображено распределение напряжений. В центре выделена область параметров, обеспечивающих наименьшие напряжения в компаунде при заданной нагрузке. Определено, что оптимальные результаты достигаются при выборе радиуса армирующего элемента в 28,5 мм и толщине слоя компаунда в 3 мм (точка А).

Испытания макетов датчика

Для проведения гидростатических испытаний по разработанной конструкторской документации были выполнены макеты датчика. В качестве рабочего оборудования выбран гидробаллон ВД-900 (рабочее давление до 88,2 МПа; габариты полезного объема: диаметр – 260 мм, глубина – 870 мм). Испытания проводились в соответствии с данными Таблицы. Максимальные значения гидростатического давления выбирались в соответствии с максимальными рабочими глубинами погружения исследовательских аппаратов [6–8].

Таблица
Программа гидростатических испытаний

Гидростатическое давление, атм. (МПа)	Время выдержки, мин.
100 (9,8)	10
150 (14,7)	10
200 (19,6)	10
300 (29,4)	10
450 (44,1)	10
600 (58,8)	60
900 (88,2)	30

После каждого испытания макеты подвергались внешнему осмотру на наличие нарушения целостности компаунда датчика, а также на стойкость изоляции при помощи мегаомметра при напряжении 100 В. Проверка изоляции выходных цепей производилась между контактами и корпусом (поочередно) и контактами между собой. Предполагалось, что макет выдержал испытания, если значение сопротивления изоляции составило не менее 50 МОм.

После завершения всех испытаний макеты не имели трещин, сколов и вмятин, сопротивление изоляции не опускалось ниже величины 50 МОм. Исходя из результатов испытаний и теоретических расчетов, можно утверждать следующее:

- применение корпуса и армирующего элемента позволяют перераспределить возникающие в датчике напряжения и снизить их значения в наименее прочном изолирующем компаунде. При этом в наиболее нагруженное состояние переходят корпус и армирующий элемент, прочность которых в несколько раз больше прочности компаунда;
- данные, полученные при математическом моделировании, коррелируют с результатами испытаний и могут быть использованы для дальнейших исследований, а также могут стать основой для построения новых моделей в случае создания новых датчиков или модификаций уже имеющихся.

Заключение

В результате проделанной работы была построена математическая модель датчика индукционного лага. Подобраны и оптимизированы конструктивные параметры, повышающие устойчивость датчика к внешнему гидростатическому давлению. Изготовлены макеты датчиков повышенной прочности. Проведены испытания макетов, подтверждающие жизнеспособность новой конструкции в глубоководных условиях. Следующим этапом работы станет изготовление и проведение испытаний опытного образца.

Публикации

1. *Воронов А.С., Евстифеев М.И.* Оценка точности индукционных лагов для глубоководных морских объектов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3958/3958.pdf> (дата обращения: 15.09.16).
2. *Аванесов Ю.Л., Воронов А.С., Буканова А.Н.* Исследование напряженно-деформированного состояния датчиков измерителей скорости // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 1. СПб., 2016. С. 194–195.
3. *Аванесов Ю.Л., Воронов А.С., Евстифеев М.И.* Компьютерное моделирование прочностных характеристик датчика индукционного лага // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 738–744.
4. *Воронов А.С., Буканова А.Н.* Повышение эксплуатационных характеристик датчика индукционного лага // Конференция молодых ученых и специалистов 2016. Тезисы докладов. СПб., 2016. С. 136.

Литература

1. *Буриличев А.В.* Будущее человечества неразрывно связано с изучением, исследованием океана // Безопасность России. 2011. № 5. С. 40–43.
2. *Сагалевич А.М.* Подводные обитаемые аппараты ИО РАН // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанических исследований (МСОИ-2015)». Т. 2. М., 2015. С. 14–30.
3. *Андреев С.И.* Минеральные ресурсы Мирового океана: перспективы изучения и освоения // Геология морей и океанов. М., 2007. С. 85–87.
4. Российский морской регистр судоходства [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rs-class.org/ru/> (дата обращения: 17.10.16).
5. *Филимонов А.К.* Подводная робототехника // Экстремальная робототехника: материалы международной научно-технической конференции. СПб., 2011. С. 43–49.
6. *Грищенко Н.* Аппарат «Русь» погрузился на предельную глубину [Электронный ресурс] // РГ Сила [Офиц. сайт]. URL: <http://rg.ru/2015/12/14/rus-site-anons.html> (дата обращения: 25.06.2016).
7. *Лисицын А.П.* Колумбы океанских глубин // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 842–848.
8. *Конюхов Ф.* Российский проект погружения в Марианскую впадину Тихого океана [Электронный ресурс] // Фёдор Конюхов [Офиц. сайт]. URL: <http://konyukhov.ru/projects/expedition/rossijskij-proekt-pogruzheniya-v-marianskuyu-vpadinu-tixogo-okeana.html> (дата обращения: 25.06.2016).



Галяев Павел Олегович
Факультет холодильной, криогенной техники и кондиционирования
Кафедра криогенной техники
E-mail: pavel.galyaev@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТУПЕНИ ПОРШНЕВОГО ДЕТАНДЕРА С ВНУТРЕННИМ ОРЕБРЕНИЕМ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ

П.О. Галяев

Научный руководитель – профессор И.К. Прилуцкий

Актуальность настоящей работы определяется сложившейся тенденцией увеличения производительности машин объемного действия по частоте вращения вала и средней скорости поршня, что позволяет снизить их удельные массо-габаритные показатели. Следствием такого подхода является повышение теплонагруженности машин, что чревато возникновением опасных (взрывоопасных) ситуаций и снижением эффективности их работы. Внедрение внутреннего оребрения цилиндра и примыкающих к нему полостей является одним из путей устранения отрицательного влияния указанных факторов, поскольку позволяет существенно снизить температуру газа по ступеням в условиях эксплуатации [1].

На современном этапе повышение технического уровня вновь разрабатываемых и модернизируемых машин объемного действия (МОД) различного назначения и их конструктивного исполнения связано с расширением роли науки в решении задач эффективного использования всех видов материальных ресурсов, в создании и внедрении отечественной ресурсосберегающей техники. Решающее значение при этом имеет постановка прикладных исследований направленных на:

- развитие современных методов расчета и оптимального проектирования прогрессивных видов изделий;
- снижение удельной материало- и энергоемкости оборудования;
- повышение эффективности, надежности и качества продукции;
- доведение результатов исследований до фактического внедрения;
- обеспечение технико-экономических показателей создаваемой техники соответствующих уровню лучших отечественных и зарубежных образцов.

Проведение предложенных мероприятий позволит снизить удельные массо-габаритные показатели в сочетании с высокой эффективностью и надежностью детандеров нового поколения, укомплектованных самодействующими нормально-открытыми клапанами и золотниковыми устройствами, при работе на различных газах, газовых и газожидкостных смесях в широком диапазоне режимных параметров.

В цилиндре детандерной ступени количество теплоты Q , подводимой к газу за цикл, в первом приближении можно представить в виде уравнения [3]:

$$Q = \alpha * F_{т.о.}^* * (T_{г} - T_{ст}) * \tau_{ц}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи [Вт/(м²·К)]; $F_{т.о.}^*$ – площадь поверхности теплообмена цилиндра детандера [м²]; $T_{г}$ – температура газа в цилиндре [К]; $T_{ст}$ – температура стенки цилиндра [К]; $\tau_{ц}$ – время цикла [с].

По мере увеличения объема цилиндра ступени детандера при неизменных режиме работы, температуре стенок цилиндра, скорости газа на входе в ступень, длительности отдельных процессов цикла количество теплоты, подводимой к единице массы газа за время цикла $\tau_{ц}$, должно снижаться, так как объем цилиндра ступени детандера пропорционален кубу его диаметра. В то же время за цикл средняя площадь поверхности теплообмена цилиндра детандера $F_{т.о}^*$ пропорциональна квадрату его диаметра. Для анализа данного соотношения необходимо ввести параметр Ω^* , который характеризует величину удельной теплообменной поверхности цилиндра детандера [4].

$$\Omega^* = F_{т.о}^* / V_h \quad \text{или} \quad \Omega^* = F_{т.о}^* / \rho_n V_h. \quad (2)$$

С учетом соотношений: $F_{т.о}^* = 2k_p F_{п} + 0,5\pi D S_{п}$; $V_h = \pi D^2 S_{п} / 4$ и $\Psi = S/D$ выражение для Ω^* можно представить в виде:

$$\Omega^* = 2(k_p + \Psi) / S_{п} \quad [\text{м}^2 / \text{м}^3] \quad \text{или} \quad F_{уд} = 2(k_p + \Psi) / \rho_n S_{п} \quad [\text{м}^2 / \text{кг}], \quad (3)$$

где k_p – коэффициент оребрения внутренней поверхности цилиндра; Ψ – величина конструктивного исполнения механизмов движения, цилиндра ($0,4 \leq \Psi \leq 4$); ρ_n – плотность газа на входе в цилиндр [$\text{кг} / \text{м}^3$]; $S_{п}$ – величина хода поршня [мм].

Величина Ψ может находиться в диапазоне от $0,4 \leq \Psi \leq 4$ в зависимости от величины параметров базы (S, n, P_0) и начального давления на входе в детандер p_n .

В соответствии с выражением (2) количество подводимой к газу теплоты зависит от коэффициента теплоотдачи α и площади поверхности теплообмена цилиндра детандера $F_{т.о}^*$. Величина α может задаваться постоянной или в виде зависимости $\alpha = f(\varphi, c_{п}, M_n)$, учитывающей особенности параметров ступени цилиндра детандера (род газа, конструкцию ступени, динамику органов газораспределения, режим ее работы, тепловое состояние цилиндра, процессы механического трения и массообмена).

Следовательно, необходим расчетный анализ работы детандерных ступеней отличающихся величиной Ω^* . Для этого в работе используется математическая модель, основанная на допущении о неподвижности газа и равенства параметров в любой точке переменного во времени объема цилиндра.

При проведении расчетного анализа ставилась задача изучения процессов, протекающих в детандерных ступенях [5], укомплектованных одно- и двухклапанной системами газораспределения, изображенных на рис. 1. Наименьшая величина относительного мертвого пространства характерна для двухклапанного исполнения детандерной ступени и составляет $a = 0,08$. Величина мертвого пространства может быть увеличена за счет «проставок» на торце цилиндров и достигать значения $a = 0,2$ (что характерно для ступеней с одноклапанным газораспределением).

Параметры объекта исследования (ступени поршневого детандера ПД-4У4-105):

- диаметр поршня $D = 105$ мм;
- ход поршня $S_{п} = 110$ мм;
- частота вращения вала $n = 1500$ об/мин;
- начальное давление $p_n = 5$ МПа;
- конечное давление $p_k = 0,45$ МПа;
- начальная температура $T_n = 230$ К.

Ожидаемые качественные различия в рабочих циклах показаны на рис. 2.

При выполнении численного анализа должно соблюдаться условие равенства массовых расходов газа в ступенях поршневого детандера ($m = \text{const}$) с различными системами газораспределения (одноклапанная и двухклапанная). При этом требуется сохранять одинаковые значения относительного хода поршней детандера в конце обратного сжатия S_6 и в момент окончания процесса наполнения S_2 , что при численном анализе достигалось путем корректировки величины мертвого пространства a .

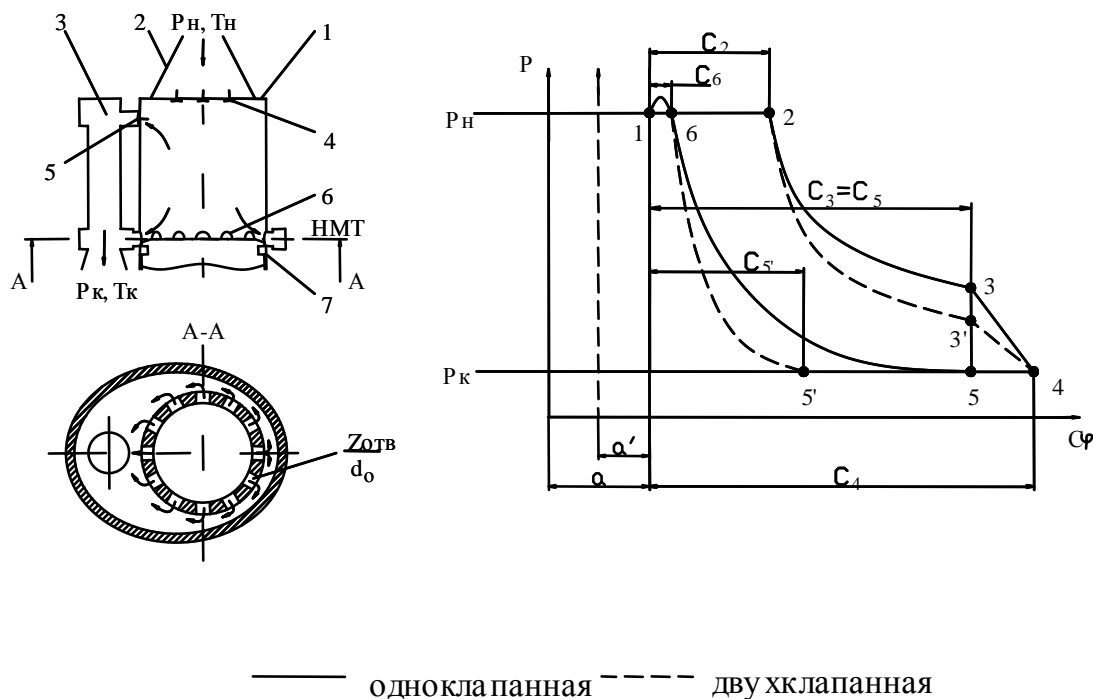


Рис. 1. Схема и рабочие циклы детандерной ступени

При выполнении численного анализа на первом этапе были исследованы:

- ступень детандера одноклапанная прямоточная, у которой величина мертвого пространства составляет $a = 0,128$.
- ступень детандера с двухклапанным газораспределением при величине мертвого пространства $a = 0,08$.

При равенстве C_2 и C_6 расход газа через ступень в обоих случаях составлял 1540 кг/ч. С такими ограничениями различие в рабочих циклах ступеней детандера является следствием изменения величины относительного хода поршня C_i в начале процесса обратного сжатия $C_5 = C_3$.

В одноклапанной ступени значения величин $C_5 = C_3 = 0,82$ определяют в зависимости от размеров выхлопных окон. При двухклапанной системе газораспределения величина C_5 по мере уменьшения относительного мертвого пространства снижается и при $a = 0,08$ становится минимально возможной: $C_5 = 0,36$. Уменьшение относительного мертвого пространства a и C_5 соответствует более полному расширению газа и получению предельно низкой его температуры на выходе детандерной ступени. Различие в протекающих рабочих процессах детандерной ступени ясно видно при наложении температурных и индикаторных диаграмм ступеней детандера друг на друга. На Рис. 2 изображены диаграммы текущего давления и температуры газа в рабочих камерах конструктивно различных детандерных ступеней.

Обнаруженные особенности индикаторных диаграмм будут иметь влияние на температуру газа в реперных точках циклов ступеней.

Из графиков, представленных на рис. 2, видно, что температура газа в начале процесса обратного сжатия в двухклапанной системе газораспределения внешне адиабатной ступени гораздо выше, чем в одноклапанной системе. Тем не менее из-за снижения отношения давлений на участке сжатия 5-6 конечные температуры газа в точке 6 графиков почти одинаковы для обоих вариантов ступеней.

Если брать в расчет теплообмен газа со стенками цилиндра, то его температура в начале процесса сжатия растет и к моменту открытия впускного клапана газ выталкивается во впускную полость с температурой $T_6 \approx T_1 > T_n$.

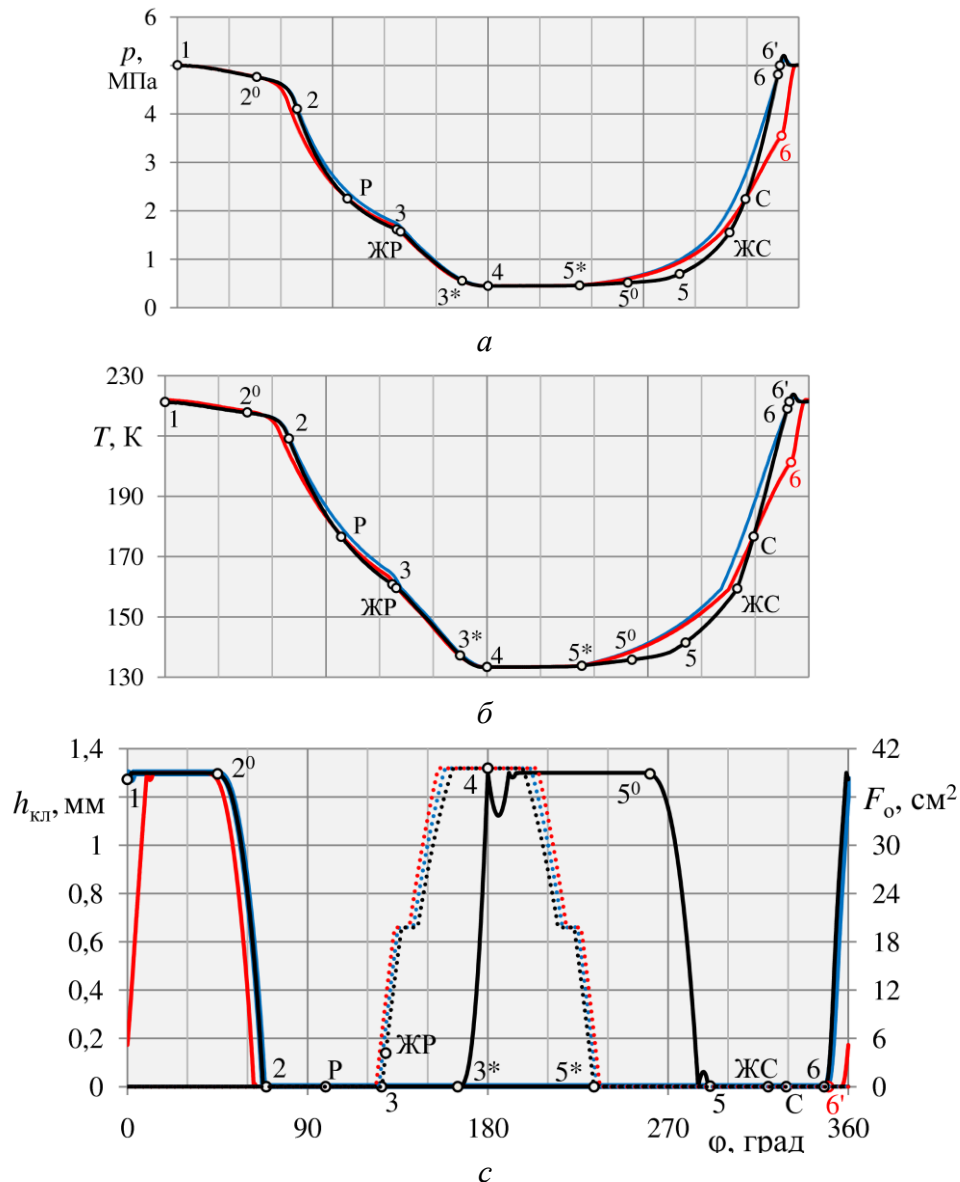


Рис. 2. Графики зависимостей: а – текущего давления p ; б – температуры T в рабочей камере; с – перемещения пластин клапанов $h_{кл}$ ступени детандера от угла поворота

— одноклапанная схема
 — схема с толкателем
 — двухклапанная схема
 F_o

Заключение

В результате проведенного исследования была достигнута цель и решены поставленные задачи.

Перспектива развития данного научного направления представляется возможной при условии совокупного внутреннего оребрения цилиндров и крышек ступеней машин объемного действия с водяным охлаждением, а также расчетно-теоретического

и экспериментального исследования работы ступеней детандеров со встроенными регенераторами.

Численный эксперимент проводился на основе программы КОМДЕТ-М [2], обеспечивающей комплексную выходную информацию о работе ступени в графической и цифровой формах (рис. 2).

Дальнейшие исследования необходимо провести на реальной машине объемного принципа действия ДКА20-8/1С, расположенной в лаборатории Университета ИТМО ИХиБТ на кафедре криогенной техники, с модернизированной системой клапанов, показанной на рис. 3.



а

б

Рис. 3. Фотографии внешнего вида клапанной крышки цилиндра ДКА20-8/1С:
а – со стороны цилиндра; б – со стороны впускной камеры

У машин объемного принципа действия (компрессоров и детандеров) хорошие перспективы развития. Они дают возможности для воплощения уникальных идей, которые будут способствовать развитию направления теплообмена и эффективности МОД для производственных нужд.

При выполнении проекта были поставлены и решены следующие задачи:

- посредством анализа научной литературы и диссертационных работ исследованы теоретические аспекты проблемы;
- выявлены проблемы и перспективы промышленной индустрии;
- разработана математическая модель ступени МОД для дальнейшего анализа процессов теплообмена при внутреннем оребрении цилиндров.

Планируется дальнейшее более глубокое исследование затронутой проблематики.

Публикации

1. Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Прилуцкий И.К., Галяев П.О. Оценка эффективности работы компрессора высокого давления на v-образных базах с различным числом рядов // Морской вестник. 2014. № 3 (51). С. 39–41.
2. Прилуцкий И.К., Прилуцкий А.И., Короткая И.П., Корнев В.В., Молодов М.А., Галяев П.О., Сназин А.А. Анализ процессов теплообмена в ступени высокооборотного поршневого детандера // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2015. № 2 (18). С. 81–91.
3. Prilutskiy I.K., Prilutskiy A.I., Galyaev P.O., Molodov M.A. The estimation of expediency of the cylinder internal finning in the single-stage compressor with a temporary-rotary operating mode // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 233–236.
4. Галяев П.О., Молодов М.А., Молодова Ю.И., Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К. К вопросу о внутреннем оребрении рабочих камер компрессоров с повторно-кратковременным режимом работы // Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 6. С. 34–40.

Литература

1. Прилуцкий И.К., Галяев П.О. О целесообразности внутреннего обребрения полостей всасывания и нагнетания поршневого компрессора периодического действия [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3383/3383.pdf> (дата обращения: 12.04.2016 г.).
2. Прилуцкий И.К. и др. Использование прикладной программы КОМДЕТ при изучении курса «Машины низкотемпературной техники». Доклад на международном семинаре «Адаптация магистерских программ вузов России и ближнего зарубежья к требованиям Болонского процесса. Опыт реализации проектов TEMPUS». М., 2012. – 3 с.
3. Прилуцкий И.К. Метод определения локальных текущих коэффициентов теплоотдачи в элементах ступеней машин объемного действия // Технические газы. 2013. № 4. С. 24–31.
4. Арсеньев И.А. и др. Учет реальных свойств рабочих веществ при моделировании процессов, протекающих в ступенях машин объемного действия // Известия Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. 2009. № 1. С. 35–42.
5. Новотельнов В.Н. и др. Криогенные машины: Учебник для вузов. СПб., 1991. – 335 с.



Грибаев Алексей Иванович
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: a.griboev@gmail.com

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАПИСИ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСИМЕРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.И. Грибаев

Научный руководитель – доцент С.В. Варжель

Введение

В настоящий момент волоконные брэгговские решетки (ВБР) с различными параметрами требуются для создания чувствительных элементов и отражателей в волоконно-оптических датчиках, резонаторных зеркал в волоконных лазерах, сглаживающих фильтров в оптических усилителях, а также для уплотнения каналов по длине волны и компенсации дисперсии в магистральных каналах связи. Запись волоконных решеток Брэгга с помощью интерферометра Гальбота является наиболее гибким методом и имеет ряд преимуществ:

- отсутствие непосредственного контакта фазовой маски и оптического волокна позволяет производить запись ВБР непосредственно в процессе вытяжки световодов;
- возможность изменения периода интерференционной картины путем поворота зеркал, что позволяет записывать ВБР в широком диапазоне длин волн брэгговского резонанса.

Цель данного проекта – разработка и создание лабораторной установки для записи волоконных решеток Брэгга интерферометрическим методом с использованием эксимерной лазерной системы отечественного производства.

Основная часть

Для создания лабораторной установки в качестве источника излучения используется KrF-эксимерная лазерная система *Optosystems Ltd. CL-7550*. Работы по созданию эксимерных лазеров с высокой энергией и когерентностью проводились на промышленных образцах лазеров, разработанных и созданных в Центре физического приборостроения Института общей физики им. А.М. Прохорова (ЦФП ИОФ РАН) [1].

Лазерная система генерирует импульсы длительностью 17 нс на полувысоте с длиной волны излучения 248,3 нм и работает в режиме синхронизации от 1 до 50 Гц. Номинальная энергия в импульсе данной системы достигает 250 мДж с шириной спектра излучения < 3 пм и размером пучка 20×6 мм². На рис. 1 представлено распределение энергии в пучке с апертурной диафрагмой 14×6 мм², полученное с помощью анализатора профиля пучка.

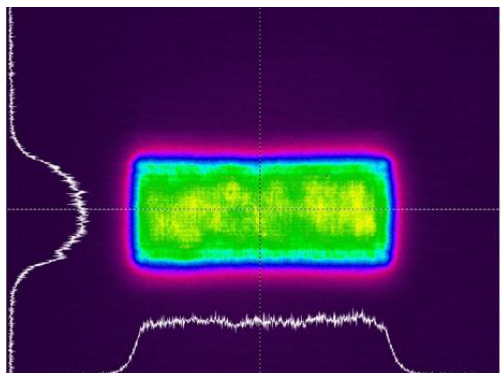


Рис. 1. Распределение энергии в пучке

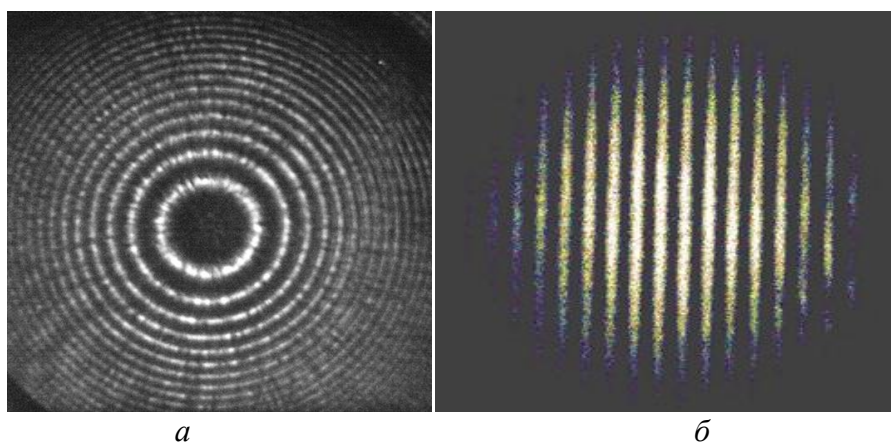


Рис. 2. Интерференционные картины, полученные с помощью:
а – эталона Фабри – Перо, б – интерферометра Юнга

Ширина спектральной линии излучения на полувысоте составляет примерно 1,6 пм, а пространственная когерентность > 5 мм, что позволяет создавать контрастную интерференционную картину с помощью интерферометра Тальбота. На рис. 2 представлены фотографические изображения интерференционных картин с эталона Фабри – Перо (а) и интерферометра Юнга (б) с базами 5 мм.

Представленные характеристики генерируемого лазерного излучения позволяют эффективно записывать ВБР интерферометрическим методом в фоторефрактивные оптические волокна.

На рис. 3 изображена функциональная схема лабораторной установки, состоящая из эксимерной лазерной системы, транспортировочных зеркал, интерферометра Тальбота и систем контроля:

- система оперативного контроля ширины линии лазерного излучения на базе интерферометра Фабри – Перо;
- система контроля распределения энергии в пучке с использованием анализатора профиля пучка *Ophir Optronics SP 620*;
- система контроля плотности энергии лазерных импульсов в области записи ВБР;
- система контроля положения оптического волокна (ОВ) относительно лазерного излучения.

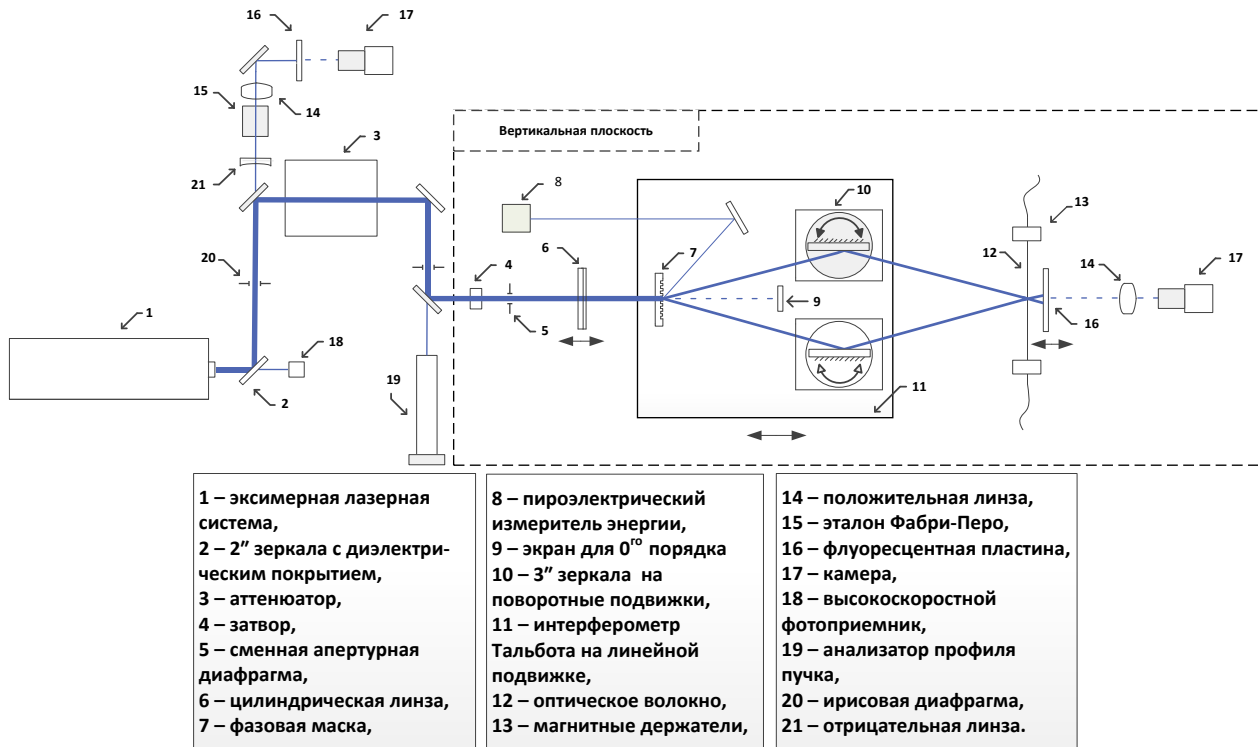


Рис. 3. Функциональная схема лабораторной установки для записи ВБР

Цилиндрическая линза 6 с фокусным расстоянием 500 мм, установленная на линейном трансляторе, используется для увеличения плотности энергии в области записи решеток. Фазовая маска 7 и поворотные подвижки с зеркалами 10 расположены на единой плите, установленной на линейной подвижке. Фазовая маска производства *Ibsen Photonics* с постоянным периодом 1000 шт/мм служит в качестве дифракционного элемента. В зависимости от режима записи решеток Брэгга и требуемой их эффективности, в лабораторном стенде установлен аттенюатор 3 для плавного изменения энергии лазерного излучения. Для определения плотности энергии пучка, воздействующего на оптическое волокно 12, требуется измеритель энергии 8. Сенсор расположен таким образом, чтобы контролировать энергию каждого пучка, участвующего в процессе записи ВБР. Фазовая маска разделяет энергию проходящего излучения на порядки дифракции под различными углами, измеритель энергии установлен в +3 третьем порядке дифракции.

Для создания интерференционной картины с высокой контрастностью требуется излучение с повышенной временной когерентностью. В связи с этим разработана и включена в состав стенда оперативная система контроля ширины спектральной линии излучения. В качестве спектрального прибора применяется эталон Фабри – Перо 15. Через транспортирующее зеркало 2 проходит порядка 0,4 % падающей энергии, которой достаточно для получения интерференционной картины с эталона. Строится изображение интерференционных колец на флуоресцентной пластине 16 и регистрируется камерой 17.

В связи с частотным режимом работы лазерной системы 1 в лабораторный стенд включен затвор с шаговым двигателем 4, который позволяет в режиме синхронизации

выделять один лазерный импульс при рабочей частоте 20 Гц (для возможности записи ВБР в одноимпульсном режиме) и определенное количество импульсов при многоимпульсной экспозиции.

Система по контролю положения ОВ относительно пучка позволяет точно устанавливать световод в плоскость интерференционной картины для полного перекрытия облучаемого образца. Это достигается с помощью флуоресцентной пластины расположенной в плоскости ОВ. Путем перемещения пластины непосредственно за волокно, по теневой картине наблюдается положение ОВ относительно пучка (рис. 4). Регистрация данных изображений производится камерой с синхронизацией.

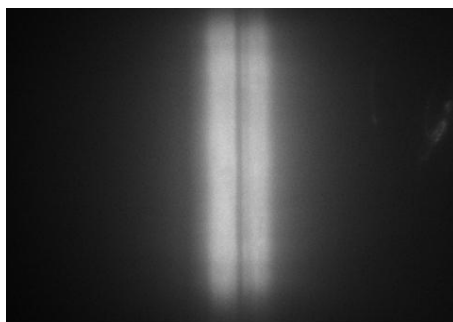


Рис. 4. Положение волокна относительно воздействующего пучка

Анализатор профиля пучка 19 *Ophir Photonics SP620*, входящий в лабораторную установку, позволяет качественно проводить юстировку лазерной системы и элементов оптической схемы. Он установлен в оптической схеме таким образом, чтобы наблюдать распределение энергии в пучке непосредственно в процессе записи ВБР.

Представленные системы контроля позволяют оперативно детектировать и исправлять негативные изменения в лабораторной установке. Кроме того, на распределении энергии в пучке негативно сказываются воздушные потоки, что в свою очередь отрицательно влияет на эффективность записи ВБР. Для минимизации их влияния над всей оптической схемой из органического стекла построен короб. Таким образом, достигается высокая стабильность параметров лазерного излучения и осуществляется эффективная запись ВБР.

Для определения спектральных характеристик ВБР, записанных на лабораторной установке, применяется оптический анализатор спектра *Yokogawa AQ6370C* с диапазоном измерений 600–1700 нм и широкополосный источник излучения *Thorlabs* с волоконным выходом.

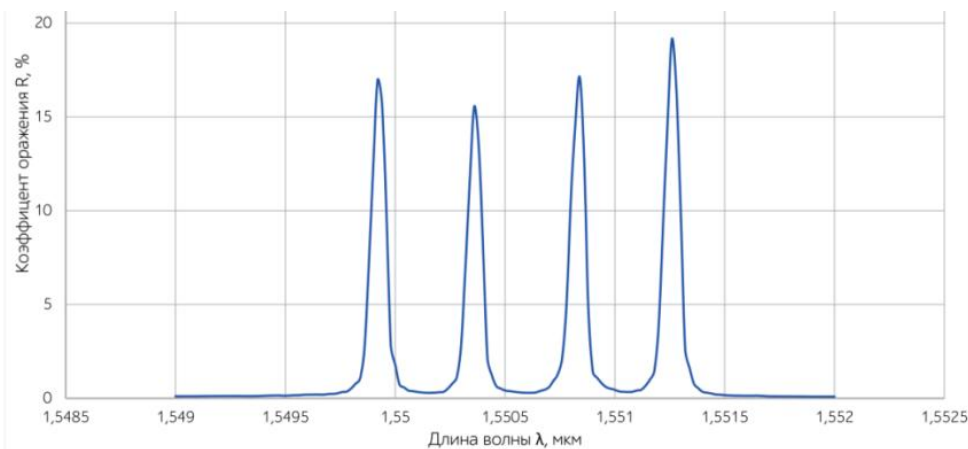


Рис. 5. Спектр массива ВБР

При повороте зеркал интерферометра Тальбота изменяется угол пересечения интерферирующих пучков и соответственно период интерференционной картины, воздействующей на волокно. Поворотные подвижки позволяют перестраивать длину волны

брэгговского резонанса индуцируемой ВБР на 0,1 нм. На рис. 5 представлен спектр массива четырех решеток Брэгга типа I, записанных в изотропное ОВ с повышенной концентрацией GeO₂. Спектральный интервал между отдельными решетками массива составляет 0,4 нм. Он используется в DWDM-системах со спектральным уплотнением каналов.

Заключение

В ходе выполнения проекта получены следующие результаты:

- подобрано необходимое оборудование для создания лабораторной установки по записи волоконных брэгговских решеток интерферометрическим методом;
- исследованы характеристики лазерного излучения KrF-эксимерной лазерной системы *Optosystems Ltd. CL-7550*;
- создана лабораторная установка по записи волоконных брэгговских решеток интерферометрическим методом;
- обеспечена стабильная работа лабораторной установки в течение длительных интервалов времени путем внедрения систем контроля, действующих в реальном времени;
- представлен спектр массива волоконных брэгговских решеток, записанных на разработанной лабораторной установке.

Предложенная технология применима для записи ВБР как на оптическом столе, так и непосредственно в процессе вытяжки оптического волокна [2], что позволяет осуществлять запись решеток без снятия защитного акрилатного покрытия, а следовательно, сохранять механические свойства волоконного световода. Представленная технология позволяет записывать массивы волоконных решеток Брэгга, мультиплексируемых по длинам волн в широком спектральном диапазоне.

Публикации

1. Petrov A.A., Varzhel' S.V., Gribaev A.I., Palanjyan D.A., Konnov K.A. High-performance fiber Bragg gratings exposed by a single 17-ns excimer laser pulse in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 9065. P. 90650H.
2. Petrov A.A., Varzhel' S.V., Gribaev A.I., Palanjyan D.A., Konnov K.A. High-performance fiber Bragg gratings induced by a single ArF excimer laser pulse in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // International Symposium «Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» (FLAMN-13): abstracts. SPb., 2013. P. 91.
3. Паланджян Д.А., Грибаев А.И., Варжель С.В., Коннов К.А., Петров А.А. Запись решеток Брэгга ArF эксимерным лазером в анизотропном оптическом волокне // Сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013». СПб., 2013. С. 315–316.
4. Плотников М.Ю., Грибаев А.И., Коннов К.А., Варжель С.В., Куликов А.В., Артеев В.А. Применение решёток Брэгга при создании современных волоконно-оптических сенсорных систем // Сборник трудов I Международной научно-практической конференции «Sensorica-2013». СПб., 2013. С. 76–77.
5. Kulikov A.V., Konnov K.A., Varzhel' S.V., Gribaev A.I. Single excimer pulse writing of Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding: visualization and thermal annealing of the gratings // European Science and Technology: materials of the V international research and practice conference. Vol. I. Munich, 2013. P. 305–310.
6. Грибаев А.И., Азаревич Р.Д., Коннов К.А., Петров А.А., Варжель С.В., Паланджян Д.А. Исследование воздействия излучения CO₂ лазера на спектральные характеристики волоконных решеток Брэгга типа II // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2014. С. 51–52.
7. Кулаченков Н.К., Коннов К.А., Куликов А.В., Варжель С.В., Грибаев А.И. Моделирование интерферометрической установки для записи волоконных брегговских решёток // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 31–32.

8. Петров А.А., Варжель С.В., Куликов А.В., Грибаев А.И., Паланджян Д.А., Коннов К.А. Запись решеток Брэгга ArF эксимерным лазером в анизотропном оптическом волокне // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 6. С. 31–36.
9. Забиякин А.Н., Варжель С.В., Коннов К.А., Грибаев А.И., Лавров В.С. Исследование влияния механических напряжений на характеристики волоконных брэгговских решеток // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica-2014». СПб., 2014. С. 74–76.
10. Варжель С.В., Мунько А.С., Куликов А.В., Коннов К.А., Грибаев А.И., Архипов С.В. Запись решеток Брэгга в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутое водородной обработке // Сборник трудов III конференции «Будущее оптики» для молодых специалистов, кандидатов наук, аспирантов и студентов оптической отрасли и смежных дисциплин. СПб., 2015. С. 145–147.
11. Грибаев А.И., Идрисов Р.Ф., Коннов К.А., Варжель С.В., Стам А.М. Создание лабораторного стенда для записи волоконных решеток Брэгга интерферометрическим методом // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». СПб., 2015. С. 535–536.
12. Идрисов Р.Ф., Грибаев А.И., Стам А.М., Коннов К.А., Варжель С.В., Куликов А.В. Исследование записи волоконных решеток Брэгга с использованием интерферометра Тальбота // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». СПб., 2015. С. 451–452.
13. Идрисов Р.Ф., Мунько А.С., Стам А.М., Грибаев А.И., Варжель С.В., Коннов К.А. Интерферометрическая запись волоконных решеток Брэгга в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Sensorica-2015». СПб., 2015. С. 112–113.
14. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В., Грибаев А.И., Коннов К.А. Исследование термического воздействия на волоконные решетки Брэгга, индуцированные в двулучепреломляющее оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой, подвергнутое водородной обработке // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». СПб., 2015. С. 424–425.
15. Stam A.M., Idrisov R.F., Gribaev A.I., Varzhel' S.V., Munko A.S., Arkhipov S.V., Konnov K.A. Interferometric writing of fiber Bragg gratings in birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // European Science and Technology: materials of the XII international research and practice conference. Munich, 2015. P. 100–104.
16. Gribaev A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel' S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // International Symposium «Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» (FLAMN-16): abstracts. SPb., 2016. P. 140–141.
17. Munko A.S., Varzhel' S.V., Arkhipov S.V., Gribaev A.I., Konnov K.A., Belikin M.N. The study of the thermal annealing of the Bragg gratings induced in the hydrogenated birefringent optical fiber with an elliptical stress cladding // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012015–012015-6.

Литература

1. Атежеев В.В. и др. Эксимерный лазер с высокой когерентностью // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 8. С. 689–694.
2. Bartelt H. et al. Single-pulse fiber Bragg gratings and specific coatings for use at elevated temperatures // Applied Optics. 2007. Vol. 46. No 17. P. 3417–3424.



Гриценко Полина Андреевна
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: polina.gritsenko@gmail.com

МЕТОД УВЕЛИЧЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СХОДИМОСТИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

П.А. Гриценко

Научный руководитель – доцент С.В. Арановский

Поиск решения проблемы идентификации параметров синусоидальных сигналов – крайне популярная задача современной теории и практики автоматического управления. Однако проблема качества оценивания, связанная с увеличением скорости параметрической идентификации, до сих пор не исследована достаточно хорошо. В то же время требования к качеству процессов при реализации современных систем являются одними из ключевых критериев при выборе того или иного подхода. В настоящей работе предлагается новый метод оценивания параметров синусоидальных сигналов, который обеспечивает возможность увеличения быстродействия параметрической идентификации. Рассматривается сигнал, состоящий из суммы двух синусоид, который может быть легко распространен на более общий случай.

Рассмотрим задачу идентификации неизвестных частот мультисинусоидального сигнала на примере двух гармоник. Очевидно, что такая задача решается не впервые [1–3]. Однако проблема быстродействия сходимости настраиваемых параметров к истинным значениям для мультисинусоидального сигнала плохо изучена. В основном предлагается решение данной проблемы и анализируется устойчивость полученных алгоритмов. Однако в работе [4] был предложен новый алгоритм идентификации частот мультисинусоидального сигнала, базирующийся на методе каскадной редукции, опубликованной в [5]. В [4] была сформулирована аналогичная проблема и даны конкретные рекомендации по ускорению процессов параметрической сходимости. Однако данный метод предусматривает интегрирование квадратичных функций, следовательно, создается ситуация, когда при идентификации параметров возникают трудности, связанные с вычислением больших значений интегралов от квадратичных функций. В этой работе будет предложен новый метод идентификации параметров синусоидальных сигналов, обеспечивающий возможность увеличения быстродействия параметрической идентификации. Будет сформулирован вспомогательный результат для идентификации параметров линейной регрессионной модели, который может быть полезен для решения ряда других аналогичных задач.

Рассмотрим измеряемый синусоидальный сигнал, представленный в виде суммы двух гармоник:

$$\delta(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \vartheta_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \vartheta_2), \quad (1)$$

где $A_1, \omega_1, \vartheta_1, A_2, \omega_2, \vartheta_2$ – неизвестные постоянные параметры.

Ставится задача синтеза алгоритма идентификации неизвестных параметров ω_1, ω_2 – частот мультисинусоидального сигнала $\delta(t)$, обеспечивающего выполнение целевого условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega}_i(t) = 0, \quad (2)$$

где $\tilde{\omega}_i(t) = \omega_i - \hat{\omega}_i(t)$ и $\hat{\omega}_i(t)$ – оценка ω_i .

Прежде чем переходить к процедуре синтеза алгоритма идентификации параметров ω_1, ω_2 , обратим внимание на некоторый вспомогательный результат, имеющий более широкое применение. Рассмотрим стандартную линейную регрессионную модель, описываемую выражением [6]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \theta_i \phi_i = \theta_1 \phi_1 + \theta_2 \phi_2 + \dots + \theta_n \phi_n, \quad (3)$$

где $y(t)$ и ϕ_i – известные ограниченные функции, θ_i – неизвестный постоянный параметр.

Для краткости и удобства изложения ограничимся рассмотрением случая $n = 2$:

$$y(t) = \sum_{i=1}^2 \theta_i \phi_i = \theta_1 \phi_1 + \theta_2 \phi_2, \quad (4)$$

Введем в рассмотрение преобразование $\alpha(\cdot)$, которое приводит уравнение (4) к виду:

$$y_1(t) = \sum_{i=1}^2 \theta_i \xi_i = \theta_1 \xi_1 + \theta_2 \xi_2, \quad (5)$$

где $y_1(t) = \alpha(y)$ и $\theta_i \xi_i = \alpha(\theta_i \phi_i)$.

Утверждение 1. Пусть функции ϕ_1, ϕ_2 и преобразование $\alpha(\cdot)$ такие, что выполнены следующие условия:

$$\int_0^{\infty} (\phi_2 \xi_1 - \phi_1 \xi_2)^2 d\tau = \infty, \quad (6)$$

$$\int_0^{\infty} (\phi_1 \xi_2 - \phi_2 \xi_1)^2 d\tau = \infty. \quad (7)$$

Пусть для идентификации параметров θ_1, θ_2 выбран алгоритм вида:

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = -k_1 (\phi_1 \xi_2 - \phi_2 \xi_1)^2 \hat{\theta}_1 + k_1 (\phi_1 \xi_2 - \phi_2 \xi_1) (y \xi_2 - y_1 \phi_2), \quad (8)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = -k_2 (\phi_2 \xi_1 - \phi_1 \xi_2)^2 \hat{\theta}_2 + k_2 (\phi_2 \xi_1 - \phi_1 \xi_2) (y \xi_1 - y_1 \phi_1), \quad (9)$$

где $k_1 > 0$ и $k_2 > 0$ – настроечные коэффициенты. Тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}_i(t) = 0, \quad (10)$$

где $\tilde{\theta}_i(t) = \theta_i - \hat{\theta}_i(t)$.

Доказательство. Сначала докажем параметрическую сходимость алгоритма идентификации (9). Для этого умножим уравнения (4) и (5) соответственно на ξ_1 и ϕ_1 :

$$y(t) \xi_1 = \theta_1 \phi_1 \xi_1 + \theta_2 \phi_2 \xi_1, \quad (11)$$

$$y_1(t) \phi_1 = \theta_1 \phi_1 \xi_1 + \theta_2 \phi_1 \xi_2. \quad (12)$$

Вычитая (12) из (11), имеем:

$$y(t) \xi_1 - y_1(t) \phi_1 = \theta_2 (\phi_2 \xi_1 - \phi_1 \xi_2). \quad (13)$$

Рассмотрим функцию:

$$\tilde{\theta}_2(t) = \theta_2 - \hat{\theta}_2(t). \quad (14)$$

Дифференцируя (14) с учетом (9) и (13), получим:

$$\dot{\tilde{\theta}}_2(t) = \dot{\theta}_2 - \dot{\hat{\theta}}_2(t) = k_2(\phi_2\xi_1 - \phi_1\xi_2)^2 \hat{\theta}_2 - k_2(\phi_2\xi_1 - \phi_1\xi_2)(y\xi_1 - y_1\phi_1) = -k_2(\phi_2\xi_1 - \phi_1\xi_2)^2 \tilde{\theta}_2. \quad (15)$$

Интегрируем (15): $\tilde{\theta}_2(t) = \tilde{\theta}_2(0) e^{-k_2 \int_0^t (\phi_2\xi_1 - \phi_1\xi_2)^2 d\tau}$, откуда при выполнении условия (6) следует, что $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}_2(t) = 0$.

Теперь докажем параметрическую сходимость алгоритма идентификации (8). Действуя по аналогии с предыдущим случаем, получаем:

$$y(t)\xi_2 - y_1(t)\phi_2 = \theta_1(\phi_1\xi_2 - \phi_2\xi_1). \quad (16)$$

Дифференцируя $\tilde{\theta}_1(t) = \theta_1 - \hat{\theta}_1(t)$ с учетом (8) и (16), имеем:

$$\dot{\tilde{\theta}}_1 = k_1(\phi_1\xi_2 - \phi_2\xi_1)^2 \hat{\theta}_1 - k_1(\phi_1\xi_2 - \phi_2\xi_1)(y\xi_2 - y_1\phi_2) = -k_1(\phi_1\xi_2 - \phi_2\xi_1)^2 \tilde{\theta}_1. \quad (17)$$

Интегрируя (17), получаем:

$$\tilde{\theta}_1(t) = \tilde{\theta}_1(0) e^{-k_1 \int_0^t (\phi_1\xi_2 - \phi_2\xi_1)^2 d\tau},$$

откуда при выполнении условия (6) следует $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}_1(t) = 0$.

Замечание 1. Следует отметить, что в качестве преобразования $\alpha(\cdot)$ может быть выбран простейший линейный фильтр вида:

$$W(p) = \frac{b(p)}{a(p)},$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования, полином $a(p)$ – гурвицев.

Замечание 2. Для решения более сложного случая при $n > 2$ может быть использована следующая далее идеология, которая аналогична случаю $n = 3$. Рассмотрим уравнение:

$$y = \sum_{i=1}^3 \theta_i \phi_i = \theta_1 \phi_1 + \theta_2 \phi_2 + \theta_3 \phi_3. \quad (18)$$

Введем в рассмотрение преобразования $\alpha_1(\cdot)$, $\alpha_2(\cdot)$ и $\alpha_3(\cdot)$ такие, что:

$$y_1 = \theta_1 \xi_1 + \theta_2 \xi_2 + \theta_3 \xi_3, \quad (19)$$

$$y_2 = \theta_1 \beta_1 + \theta_2 \beta_2 + \theta_3 \beta_3, \quad (20)$$

$$y_3 = \theta_1 \mu_1 + \theta_2 \mu_2 + \theta_3 \mu_3. \quad (21)$$

Умножим (18) и (19) соответственно на ξ_1 и ϕ_1 , а (20) и (21) на μ_1 и β_1 . Далее, вычитая одно из другого, получаем:

$$y\xi_1 - y_1\phi_1 = \theta_2(\phi_2\xi_1 - \xi_2\phi_1) + \theta_3(\phi_3\xi_1 - \xi_3\phi_1)\bar{b}, \quad (22)$$

$$y_2\mu_1 - y_3\beta_1 = \theta_2(\beta_2\mu_1 - \mu_2\beta_1) + \theta_3(\beta_3\mu_1 - \mu_3\beta_1). \quad (23)$$

Таким образом, мы избавились от параметра θ_1 . Теперь умножим (22) и (23), соответственно на $(\beta_2\mu_1 - \mu_2\beta_1)$, $(\phi_2\xi_1 - \xi_2\phi_1)$ и вычтем одно уравнение из другого:

$$\begin{aligned} & (y\xi_1 - y_1\phi_1)(\beta_2\mu_1 - \mu_2\beta_1) - (y_2\mu_1 - y_3\beta_1)(\phi_2\xi_1 - \xi_2\phi_1) = \\ & = \theta_3((\phi_3\xi_1 - \xi_3\phi_1)(\beta_2\mu_1 - \mu_2\beta_1) - (\beta_3\mu_1 - \mu_3\beta_1)(\phi_2\xi_1 - \xi_2\phi_1)). \end{aligned}$$

Итак, мы получили регрессионную модель с одним параметром θ_3 и, следовательно, можно применить алгоритм идентификации аналогичный (9).

Осуществим параметризацию модели (1) следующим образом:

$$p^4 \delta(t) = \theta_1 p^2 \delta(t) + \theta_2 \delta(t), \quad (24)$$

$$\delta(t) = \frac{4\lambda p^3 + 6\lambda^2 p^2 + 4\lambda^3 p + \lambda^4}{(p + \lambda)^4} \delta(t) + \theta_1 \frac{p^2}{(p + \lambda)^4} \delta(t) + \theta_2 \frac{1}{(p + \lambda)^4} \delta(t), \quad (25)$$

где $\lambda > 0$ – некоторый выбираемый при синтезе коэффициент, а $\theta_1 = -(\omega_1^2 + \omega_2^2)$, $\theta_2 = -\omega_1^2 \omega_2^2$ – неизвестные параметры, подлежащие идентификации. Введем новые обозначения:

$$z(t) = \frac{p^4}{(p + \lambda)^4} \delta(t), \quad \zeta_1(t) = \frac{p^2}{(p + \lambda)^4} \delta(t) \text{ и } \zeta_2(t) = \frac{1}{(p + \lambda)^4} \delta(t).$$

Тогда для модели (1) имеем:

$$z(t) = \theta_1 \zeta_1(t) + \theta_2 \zeta_2(t) + \varepsilon(t), \quad (26)$$

где $\theta = \text{col}\{\theta_1, \theta_2\}$, $\zeta = \text{col}\{\zeta_1, \zeta_2\}$ и $\varepsilon(t)$ – экспоненциально затухающее слагаемое, обусловленное ненулевыми начальными условиями.

Аналогично с [6], пренебрегая $\varepsilon(t)$, можно воспользоваться алгоритмом идентификации вида:

$$\dot{\hat{\theta}} = -k \zeta \zeta^T \hat{\theta} + k \zeta z, \quad (27)$$

где $\hat{\theta}$ – оценка вектора θ , а $k > 0$ – некоторый коэффициент, либо задаваемый при синтезе, либо настраиваемый в процессе работы.

В скалярном случае за счет роста коэффициента $k > 0$ можно достигать увеличения быстродействия параметрической сходимости [7]. Однако в более общем случае рост значений коэффициента $k > 0$ не позволит гарантировать такого увеличения, что в ряде технических приложений является крайне важным. Решение данной проблемы может быть найдено с использованием подхода, представленного в предыдущем разделе:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_1 &= -k_1 (\zeta_1 \bar{\zeta}_2 - \zeta_2 \bar{\zeta}_1)^2 \hat{\theta}_1 + k_1 (\zeta_1 \bar{\zeta}_2 - \zeta_2 \bar{\zeta}_1) (z \bar{\zeta}_2 - \bar{z} \zeta_2), \\ \dot{\hat{\theta}}_2 &= -k_2 (\zeta_2 \bar{\zeta}_1 - \zeta_1 \bar{\zeta}_2)^2 \hat{\theta}_2 + k_2 (\zeta_2 \bar{\zeta}_1 - \zeta_1 \bar{\zeta}_2) (z \bar{\zeta}_1 - \bar{z} \zeta_1), \end{aligned} \quad (28)$$

где в качестве преобразования $\alpha(\cdot)$ выбрано простейшее динамическое звено первого

порядка $W(p) = \frac{\gamma_1 p}{p + \gamma_2}$ с коэффициентами $\gamma_1 > 0$ и $\gamma_2 > 0$, а также $\bar{z} = \frac{\gamma_1 p}{p + \gamma_2} z$, $\bar{\zeta}_1 = \frac{\gamma_1 p}{p + \gamma_2} \zeta_1$

и $\bar{\zeta}_2 = \frac{\gamma_1 p}{p + \gamma_2} \zeta_2$.

Легко показать, что для класса рассматриваемых функций выполнены условия вида (6) и (7) что в свою очередь обеспечивает сходимость $\hat{\theta}$ к θ . Далее с помощью простейших алгебраических вычислений из уравнений $\theta_1 = -(\omega_1^2 + \omega_2^2)$, $\theta_2 = -\omega_1^2 \omega_2^2$ можно найти искомые параметры ω_1 , ω_2 .

Заключение

В работе предложен новый метод увеличения быстродействия параметрической сходимости в задаче идентификации параметров синусоидальных сигналов. Был рассмотрен

случай идентификации сигнала, состоящего из суммы двух синусоид (1) и предложен алгоритм идентификации вида (27), (28). Полученные результаты компьютерного моделирования иллюстрируют достижение увеличения быстродействия идентификации параметров с увеличением настроечных коэффициентов.

К перспективам развития данного подхода следует отнести:

- изучение случая наличия помех в измерениях, например с использованием авторского подхода, опубликованного в [8];
- решение задачи улучшения качества переходных процессов, связанных с решением задачи парирования колебаний большой амплитуды.

Публикации

1. *Гриценко П.А.* Методы идентификации синусоидального сигнала // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 289–290.
2. *Гриценко П.А.* Сравнение методов идентификации синусоидального сигнала // Сборник трудов XVI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб., 2014. С. 112.
3. *Aranovskiy S.V., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Gritcenko P.A.* Improved frequency identification via an adaptive filters cascade // 2014 IEEE Conference on Control Applications. Antibes, 2014. P. 140–145.

Литература

1. *Obregón-Pulido G. et al.* Globally Convergent Estimator for n-Frequencies, IEEE Transactions on Automatic Control, 47 (2002) 857–863.
2. *Xia X.* Global frequency estimation using adaptive identifiers // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. Vol. 47. No 7. P. 1188–1193.
3. *Marino R., Tomei P.* Global estimation of n unknown frequencies // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. Vol. 47. No 8. P. 1324–1328.
4. *Бобцов А.А. и др.* Гибридный алгоритм идентификации частот мультисинусоидального сигнала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 4. С. 7–10.
5. *Арановский С.В. и др.* Каскадная редукция в задачах идентификации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 12. № 3. С. 149–150.
6. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователей. М., 1991. – 432 с.
7. *Aranovskiy S.V. et al.* Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. 2010. Vol. 16. No 2. P. 129–139.
8. *Aranovskiy S.V. et al.* Improved frequency identification via an adaptive filters cascade // 2014 IEEE Conference on Control Applications. Antibes, 2014. P. 140–145.



Гусаров Вадим Федорович
Факультет лазерной и компьютерной инженерии
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: hoarfrost.vg@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ОТОБРАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНЫ

В.Ф. Гусаров

Научный руководитель – доцент А.Н. Тимофеев

Средства оптико-электронного дистанционного управления широко используются в промышленности, строительстве, геодезии. Они позволяют добиться высокой производительности и точности при позиционировании контролируемых объектов в большом диапазоне расстояний [1, 2]. Анализ применяемых в современном дорожном строительстве систем контроля смещений показал актуальность вопроса повышения точности измерений, поскольку для достижения высокой точности позиционирования в современных системах требуются серьезные инструментальные затраты, что неизбежно ведет к повышению стоимости и сложности проводимых измерений. Менее сложные методы и системы имеют ряд недостатков, связанных с малым диапазоном контроля, слабой защищенностью от воздействия внешних сил [3, 4]. Поэтому ведется работа над развитием оптико-электронных систем (ОЭС) позиционирования с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ), позволяющих обеспечить высокую энергетическую чувствительность к смещениям при меньших инструментальных затратах.

Цель представленной работы – исследование возможностей повышения точности и расширения области применения систем позиционирования за счет использования матричных фотоприемников (МФП) и цифровых методов обработки информации в системах с ОРСЗ.

Задачи:

- анализ существующих методов и систем позиционирования, применяемых в инженерной геодезии;
- исследование возможности применения в качестве приемника излучения КМОП-матриц;
- экспериментальная оценка потенциальной точности системы позиционирования с ОРСЗ на базе матричного фотоприемного устройства при контроле поперечных смещений и угловых разворотов;
- описание методики выбора разрядности аналого-цифрового преобразования в разрабатываемой системе.

Исследуемая система работает по принципу ОРСЗ – области пересечения двух и более электромагнитных полей оптического диапазона, в которой параметры, используемые для количественной оценки измерительной информации, равны, а параметры, необходимые для оценки знака, различаются. Достоинства этого класса систем: большая зона управления по горизонту и вертикали, низкое энергопотребление, устойчивость по отношению к воздействиям среды [3].

При формировании ОРСЗ (рис. 1) двумя источниками излучения (ИИ) из канала формирования базового направления (КФБН), модулированными током питания разной

частоты f_1 и f_2 , основным информативным параметром являются величины потоков Φ_1 и Φ_2 , регистрируемых в приемном канале (ПрК). На приемнике в этом случае создаются поля облученности E_1 и E_2 .

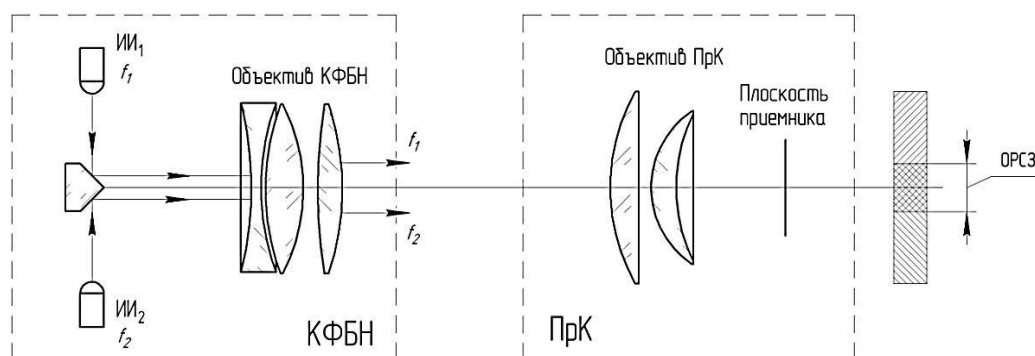


Рис. 1. Схема формирования ОРСЗ

Экспериментальные исследования чувствительности разрабатываемой ОЭС к поперечным смещениям производились на стенде, в котором установлен канал КФБН аналогичный по конструкции прожектору системы ПУЛ-Н [5], а в ПрК поочередно использовались две видеокамеры с КМОП-матрицами: VEC-545 с матрицей OV5620 5 Мпк и Defender C-2525HD с матрицей 2 Мпк.

В ходе работы было получено изображение выходного зрачка КФБН в плоскости фотоприемной матрицы. В ходе эксперимента ПрК последовательно смещался по оси ОУ в диапазоне от -12 до +12 мм, и производилась регистрация излучения от каждого из полупроводниковых излучающих диодов (ПИД) на МФП (рис. 2а и 2б).

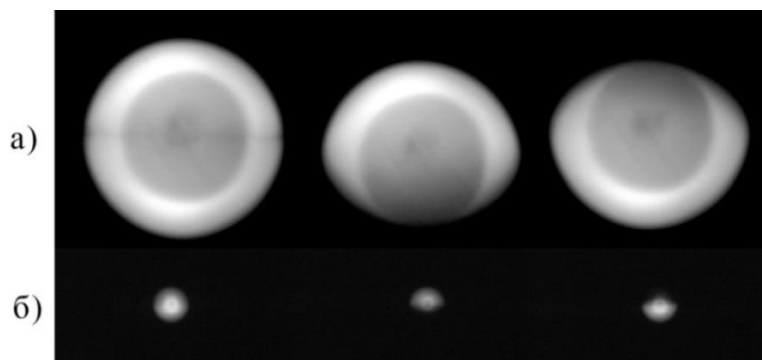


Рис. 2. Изображение выходного зрачка на МФП: а – на матрице 2 Мпк; б – на матрице 5 Мпк

Таким образом, были получены пары изображений излучения ПИД для каждого из отсчетов. Далее вычислялась разность энергетических освещенностей $\Delta\Phi$. Для этого выполнялось интегрирование по полю освещенности в каждом из изображений и вычисление их разностей для каждого отсчета. Результаты представлены на рис. 3, где показана зависимость величины разности потоков энергии от координаты по оси ОУ.

Нелинейность статической характеристики макета (рис. 3), полученной при противофазной модуляции ИИ КФБН на базе прожектора ПУЛ-Н и цифровой обработке отображения ОРСЗ с МФП при диапазоне смещений ± 12 мм, составляет величину менее 0,41 мм. При этом оценка среднеквадратического отклонения (СКО) основной составляющей погрешности контроля смещений для дистанции 6 м не превысила 0,012 мм и 0,017 мм для матриц 2 и 5 Мпк соответственно, что в несколько раз меньше, чем при ранее применявшейся аналоговой обработке информации [5].

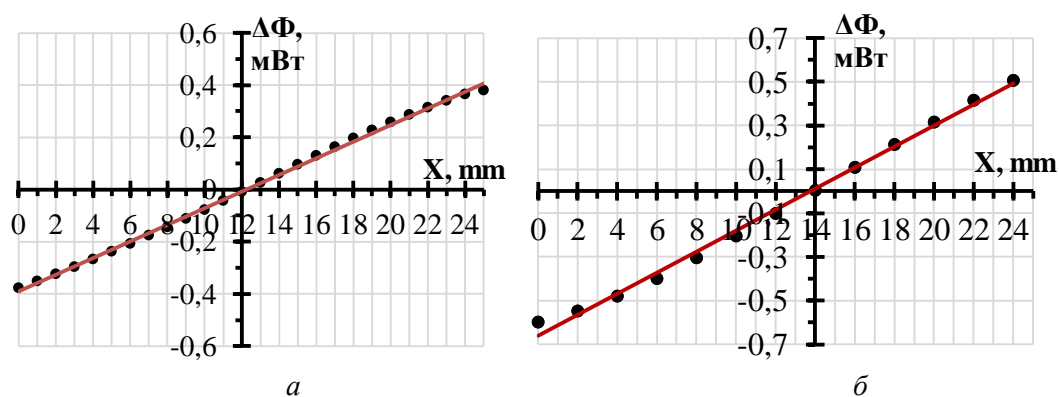


Рис. 3. Статическая характеристика экспериментального стенда: а – с матрицей 2 Мпк; б – с матрицей 5 Мпк

Для оценки углов разворота ПрК относительно ОРСЗ использовался алгоритм, согласно которому определялся энергетический центр поля облученности на МФП, полученный суммированием полей облученности от двух источников, формирующих ОРСЗ [6, 7].



Рис. 4. Статическая характеристика контроля разворотов с помощью макета с МФП 5 Мпк

Исследование разворотов показало, что оценка СКО основной составляющей погрешности контроля углов при цифровой обработке не более $11''$. При этом нелинейность статической характеристики макета (рис. 4) при диапазоне смещений $\pm 4^\circ$ не более $0,1^\circ$.

Аналого-цифровое преобразование (АЦП) точных значений аналогового (непрерывного) сигнала в приближенные (дискретные) значения, привязанные к определенному моменту времени, заключается в выполнении двух операций: квантование по уровню и дискретизация по времени [8]. Числа уровней квантования и дискретных отсчетов в единицу времени определяют точность приближения дискретных отсчетов к исходному непрерывному сигналу. Требования к точности измерения и преобразования сигнала могут быть обусловлены задачами либо его аппроксимации, либо последующей обработки.

При определении смещений за основу выбора количества пикселей в имеющемся линейном поле берется требуемое линейное разрешение системы ρ_β , которое в общем случае зависит от разности регистрируемых потоков. При этом должно выполняться условие, при котором распределение облученности в отображении зрачка КФБН не должно выходить за пределы фоточувствительной площадки МФП при возможных смещениях и разворотах.

При определении угла разворота ПрК требуется обеспечить погрешность измерения σ_β , которая в общем случае определяется не только позиционной чувствительностью алгоритма определения угла, но и воздействием внешних факторов на процесс измерения (ветер, градиенты температуры воздушного тракта). В этом случае при проектных расчетах удобно

воспользоваться принципом равного влияния факторов на процесс измерения. Если таких факторов m , то

$$\rho_{\beta} = \sigma_{\beta} / \sqrt{m}. \quad (9)$$

Многолетние исследования показали, что погрешность определения координат малоразмерных источников (размером не менее 6-8 пикселей) на фотоприемном матричном поле не превышает $k = 0,05-0,1$ размера пиксела.

$$\rho_{\beta} = k \cdot p / f_{\text{ПрК}}, \quad (10)$$

где $f_{\text{ПрК}}$ – фокусное расстояние объектива ПрК.

Из (1) и (2) нетрудно получить выражение для p :

$$p = \sigma_{\beta} \cdot f_{\text{ПрК}} / k \cdot \sqrt{m}. \quad (11)$$

В этом случае количество пикселей N в строке должно быть:

$$N = b_{\text{ПОИ}} \cdot k \cdot \sqrt{m} / f_{\text{ПрК}} \cdot \sigma_{\beta}, \quad (12)$$

где $b_{\text{ПОИ}}$ – размер элемента (пиксела) матричного фотоприемника.

Аналогично методике расчета количества пикселей в строке нетрудно рассчитать и количество строк M .

С другой стороны, размеры зрачка определяются энергетической чувствительностью $W(x,y,z)$ к смещениям, которая определяет погрешность регистрации разности оптических полей ДЦ на МФП, вызванных смещением Δy . Поскольку система должна обеспечивать необходимую погрешность контроля смещений y_w , необходимо учитывать величину Δy как составляющую погрешности, распределенную по нормальному закону

$$\Delta y = \sigma_w / \sqrt{m}, \quad (13)$$

где m – число погрешностей, наиболее влияющих на суммарную.

Величина этой погрешности определяется разрядностью с АЦП. Энергетическая чувствительность в конечном счете определяется градиентом облученности в ОРСЗ и в общем случае зависит как от величин смещений y , так и от дистанции z . В первом приближении требуемая разрядность может быть рассчитана с учетом сферической аберрации дц_s объектива, дистанции z_0 фокусировки и дистанции z работы:

$$\rho = \frac{\Phi}{\Delta\Phi} = \frac{\pi \cdot [k_1 \delta\phi_s z \cdot z_0 + D_p |z_0 - z|]}{32 z_0 \cdot \Delta y}, \quad (14)$$

где Φ – значение потока оптического излучения при максимальном перемещении ПрК на Δ_{max} .

Как известно, при наличии сферической аберрации объектива минимальная позиционная чувствительность к смещениям, а следовательно, максимальная ширина переходной зоны в ОРСЗ будет на дистанции:

$$z = \frac{2}{3} z_0.$$

В этом случае выражение (6) преобразуется к виду:

$$\rho = \frac{2\pi \cdot [k_1 \delta\phi_s z_0 + R_{\text{КФБН}}]}{3\Delta y}, \quad (15)$$

где $R_{\text{КФБН}}$ – радиус входного зрачка объектива ПрК.

В свою очередь с учетом закона распределения погрешности АЦП (закона равной вероятности), возникающей при квантовании сигналов по уровню, выражение (5) принимает вид:

$$\Delta y = \sigma_w / 2\sqrt{3m}$$

В соответствии с изложенным, значение разрядности n , выбираемой при обработке сигналов с МФП аналогово-цифровых преобразований облученностей в ОРСЗ, должно быть числом, вычисляемым по ниже приведенной формуле с округлением в большую сторону:

$$n = \frac{\pi \cdot 4\sqrt{3m} \cdot [k_1 \delta \phi_s z_0 + R_{КФБН}]}{3 \cdot \sigma_w} \quad (16)$$

Из выражения (8) видно, что определяющими при практической реализации системы являются величины сферической аберрации объектива КФБН и размеры его выходного зрачка.

Также стоит отметить, что достаточная разрядность двоичного кода АЦП, при которой уровень шумов квантования видеосигнала становится пренебрежимо малым, зависит от степени влияния других видов помех (шумов ФПУ и дискретизации изображения). И в случае наблюдения за объектами в условиях сильно меняющейся в поле зрения фоновой составляющей разрядность АЦП должна быть увеличена в соответствии с выражением [9]:

$$n_{G+F} = n + \lceil \log_2 ((G_{\max} + F_{\max}) / G_{\max}) \rceil, \quad (17)$$

где n_{G+F} – число разрядов АЦП, определяемое с учетом необходимости сохранения в цифровом изображении фоновой составляющей; n – число разрядов, достаточное для кодирования сигнальной составляющей из выражения (8); G_{\max} и F_{\max} – максимальные значения сигнальной и фоновой составляющих в видеосигнале; знак $\lceil Z \rceil$ означает округление числа Z до ближайшего целого в большую сторону.

Вместе с тем использование АЦП, обеспечивающих шаг квантования меньше величины шума не представляется целесообразным, поскольку повышение разрядности АЦП позволит лишь точнее вместе с тем усложнит схему пикселя [10].

Таким образом, было показано, что применение матричных фотоприемников и цифровых методов обработки регистрируемых отображений ОРСЗ является перспективным направлением развития ОЭС.

Заключение

Рассмотрен метод оптической равносигнальной зоны для решения задач позиционирования. Анализ современных методов и систем, применяемых в инженерно-геодезических изысканиях, определил направление исследований и показал перспективность предложенного метода.

На созданном экспериментальном стенде проведены оценки потенциальной точности работы ОЭС с ОРСЗ с применением матричных фотоприемников и с использованием цифровых методов обработки входных сигналов. Оценка СКО основной составляющей погрешности контроля смещений на дистанции 6 м не превысила 0,012 мм и 0,017 мм для матриц 2 и 5 Мпк соответственно, что в несколько раз меньше, чем при ранее применявшейся аналоговой обработке информации. Полученная оценка СКО основной составляющей погрешности контроля углов при цифровой обработке составляет менее 11", а нелинейность статической характеристики стенда в диапазоне смещений $\pm 4^\circ$ не превышает 0,1°.

Однако было отмечено, что применение КМОП-матриц в качестве приемников предъявляет дополнительные требования к сборке и юстировке оптической схемы приемной

части, а внедрение цифровых методов обработки определяет необходимость выбора элементов схемы, обеспечивающих максимальное быстродействие для достижения работы в режиме реального времени и реализации адаптивности системы.

Также была описана методика выбора оптимальной разрядности АЦП регистрируемых на матричном фотоприемнике сигналов в системе с ОРСЗ.

Публикации

1. *Maraev A.A., Timofeev A.N., Gusarov V.F.* Applying of digital signal processing to optical equisignal zone system // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9525. P. 95254B.
2. *Gusarov V.F., Maraev A.A., Timofeev A.N., Klimov A.A.* Influence of array photodetectors characteristics to the accuracy of the optical-electronic system with optical equisignal zone // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9896. P. 989615.
3. *Гусаров В.Ф., Тимофеев А.Н.* Особенности применения оптико-электронных систем позиционирования в дорожном строительстве // XI Международная конференция «Прикладная оптика – 2014»: сборник трудов. Т. 1. СПб., 2014. С. 116–119.
4. *Коняхин И.А., Maraev A.A., Тимофеев А.Н., Гусаров В.Ф.* Контроль смещений в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 1. С. 38–44.
5. *Гусаров В.Ф., Тимофеев А.Н.* Выбор и расчет элементов оптико-электронной системы с оптической равносигнальной зоной для измерения вертикального градиента температур воздушного тракта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 5. С. 44–48.

Литература

1. *Konyakhin I.A. et al.* Optic-electronic system for deformation measurement of radio-telescope counter-reflector computer modeling // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9131. P. 913110.
2. *Дементьев В.Е.* Современная геодезическая техника и ее применение. М., 2008. – 591 с.
3. *Гусаров В.Ф., Тимофеев А.Н.* Особенности применения оптико-электронных систем позиционирования в дорожном строительстве // XI Международная конференция «Прикладная оптика – 2014»: сборник трудов. Т. 1. СПб., 2014. С. 116–119.
4. *Коняхин И.А. и др.* Контроль смещений в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 1. С. 38–44.
5. *Коротаев В.В., Maraev A.A., Тимофеев А.Н.* Телеориентирование в луче с оптической равносигнальной зоной. Монография. СПб., 2015. – 339 с.
6. *Gusarov V.F. et al.* Influence of array photodetectors characteristics to the accuracy of the optical-electronic system with optical equisignal zone // Proceedings of SPIE. 2016. Vol. 9896. P. 989615.
7. *Maraev A.A. et al.* Applying of digital signal processing to optical equisignal zone system // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9525. P. 95254B.
8. *Бахтияров Г.Д. и др.* Аналого-цифровые преобразователи. М., 1980. – 280 с.
9. *Андреев А.Л., Коротаев В.В.* Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 10. С. 69–75.
10. *Marston N.* Solid-state imaging: a critique of the CMOS sensor. Edinburgh, 1998. – 263 p.



Дадеко Антонина Владимировна
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: dav3005@rambler.ru

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНОГО ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ПОРФИРИНОВОЙ ПРИРОДЫ «ДИМЕГИНА»

А.В. Дадеко

Научный руководитель – профессор И.М. Белоусова

Основная идея и цель данной работы – изучение перспективного [1, 2] фотосенсибилизатора (ФС) «Димегина» (динатриевая соль-2,4-ди(α -метоксиэтил) дейтеропорфирина IX) и определение целесообразности проведения дальнейших испытаний с последующим внедрением его в медицинскую практику. Для достижения поставленной цели в работе было проведено исследование цитотоксического и цитостатического действия «Димегина» на клеточные культуры нормальных и опухолевых тканей, определены его квантовые входы генерации синглетного кислорода, флуоресценции и фоторазрушения, а также изучено влияния сывороточного альбумина как основного белка крови человека на фотофизические свойства препарата.

Цитотоксическое и цитостатическое действия на клеточные культуры

Одним из важнейших аспектов, способствующих внедрению ФС в медицинскую практику, является изучение его цитотоксического и цитостатического действия на клеточные культуры. Влияние ФС в комплексе с излучением, генерируемым светодиодным источником, на жизнедеятельность клеток помогают охарактеризовать его эффективность, а также подобрать необходимые дозы облучения и концентрации для проведения фотодинамической терапии (ФДТ). Поскольку нашей задачей являлось доказать, что изучаемый ФС «Димегин» более эффективен в процессах ФДТ, нежели ФС, применяемые в настоящее время в России, для сравнения был выбран «Фотодитазин» [3] как наиболее перспективный среди разрешенных к использованию в медицинской практике. Исследование было проведено на двух линиях клеточных культур – нормальных фибробластах кожи человека (ФК) и клетках постоянной трансформированной клеточной линии HeLa ТК (клетки эпителиоидной карциномы шейки матки человека). Такой выбор клеточных культур позволяет не только охарактеризовать влияние ФС на злокачественные образования, но также оценить их цитотоксическое воздействие на здоровые клетки организма, что немаловажно в понимании избирательности воздействия ФС. Изучение цитостатического действия определяет степень влияния ФС на жизнедеятельность клеток без облучения, то есть их «темную токсичность».

Анализ цитотоксического и цитостатического действия ФС в отношении ФК и клеток линии HeLa проводили с помощью МТТ-теста [4], основанного на способности митохондриальных дегидрогеназ в жизнеспособных клетках конвертировать водорастворимый 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенил-2Н-тетразолиум бромид (МТТ) в формазан, который кристаллизуется внутри клеток. Измерение концентрации формазана в растворе позволяет оценить количество жизнеспособных клеток. По данным, полученным в результате проведения МТТ-теста, было показано, что исследуемые ФС оказывают различное токсическое влияние на ФК (рис. 1) и клетки линии HeLa (рис. 2).

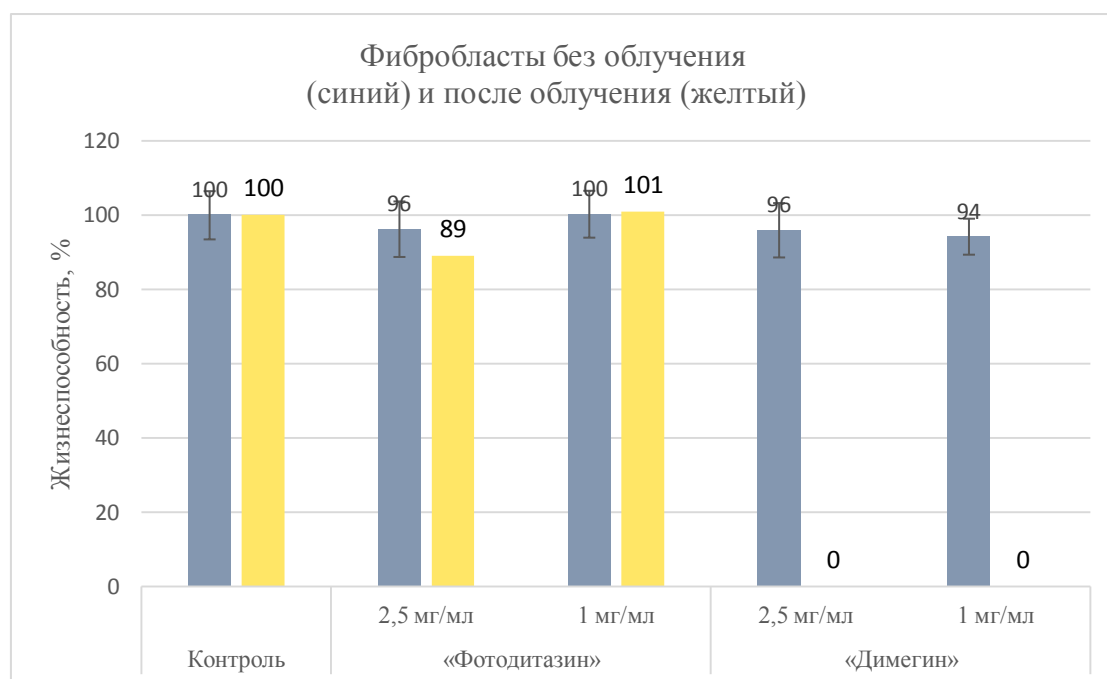


Рис. 1. Гистограммы оценки жизнеспособности ФК на первые сутки культивирования с ФС без облучения и после совместного действия ФС и облучения. МТТ-тест

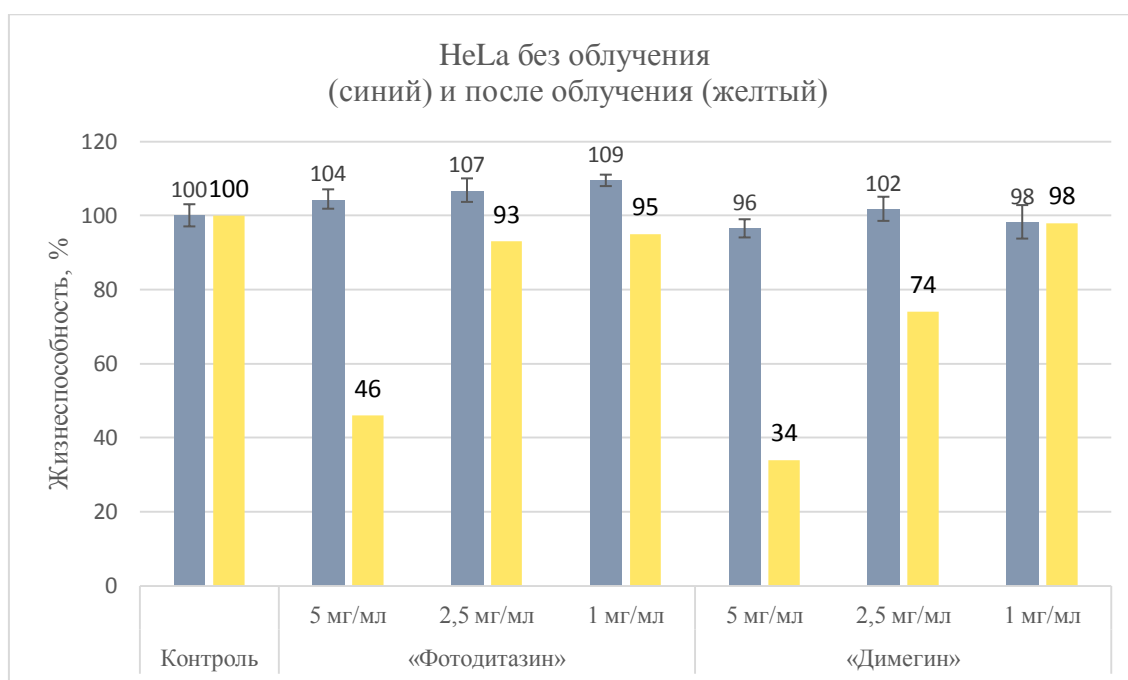


Рис. 2. Гистограммы оценки жизнеспособности клеток линии HeLa на первые сутки культивирования с ФС без облучения и после совместного действия ФС и облучения. МТТ-тест

Как можно видеть на представленных гистограммах, ФС, присутствуя в питательной среде в концентрации 5; 2,5 и 1 мкг/мл в течение первых суток культивирования без последующего облучения («темновая токсичность») не оказали явного токсического действия на оба типа клеток. МТТ-тест выявил, что ФК более чувствительны к совместному действию «Димегина» и облучения, чем клетки линии HeLa. Это может быть связано с тем, что последние, являясь постоянной трансформированной линией, более устойчивы, чем первичная линия ФК.

«Фотодитазин» в концентрации 2,5 и 1 мкг/мл с последующим облучением не оказал явно выраженного токсического действия на оба типа клеток. «Димегин» в концентрации 2,5 и 5 мкг/мл с последующим облучением обладает сильным токсическим эффектом для клеток линии HeLa.

Квантовые выходы

В результате проведенных ранее сравнительных исследований эффективности генерации синглетного кислорода, интенсивности люминесценции и фотостабильности, «Димегин» показал значительное превосходство над «Фотодитазином» и «Радахлорином» во всех аспектах [2]. Ключевым результатом такого исследования стало получение квантового выхода генерации синглетного кислорода, люминесценции и фотостабильности «Димегина». В результате эксперимента с применением индикатора синглетного кислорода SOG [5] был получен квантовый выход генерации синглетного кислорода для ФС «Димегина» в водном растворе, который составил 0,6.

При оценке квантового выхода флуоресценции «Димегина» были получены спектры люминесценции ФС-сравнения – «Протопорфирина IX» и собственно «Димегина», представленные на рис. 3. Из литературы известно, что квантовый выход флуоресценции «Протопорфирина IX» – 0,11 [6]. Произведя интегрирование площади под кривой, выяснили, что интенсивность флуоресценции «Протопорфирина IX» превосходит таковую для «Димегина» в 1,12 раз, соответственно разница между квантовыми выходами составляет такую же величину. После трехкратного повторения эксперимента с различными концентрациями убедились, что квантовый выход флуоресценции «Димегина» равен 0,098.



Рис. 3. Спектры флуоресценции «Димегина» и «Протопорфирина IX». Возбуждение флуоресценции производилось на длине волны 404 нм

Оценку фотостабильности «Димегина» провели, используя график зависимости концентрации «Димегина» в растворе от числа поглощенных фотонов. После аппроксимации получили уравнение прямой, из которой следует, что на каждый поглощенный фотон на квадратный сантиметр облучаемого вещества разрушается $3,952 \cdot 10^{-27}$ молей «Димегина».

Влияние альбумина на фотофизические свойства «Димегина»

Немаловажным являлось изучение взаимодействия ФС с сывороточным альбумином, поскольку он является одним из основных транспортных белков в организме, связывающихся с ФС и отвечающих за его доставку к новообразованию [7]. Из литературы известно, что альбумин очень активно тушит синглетный кислород, генерируемый фотовозбужденным ФС [8], влияя на эффективность фотодинамической терапии.

В экспериментах по изучению образования комплекса «Димегин – альбумин» применяли спектрофотометрический метод. Прежде всего, были получены спектры

растворов «Димегина» и сывороточного альбумина. При добавлении в раствор «Димегина» сывороточного альбумина и последующем перемешивании наблюдали трансформацию основных полос поглощения обоих соединений. Было зафиксировано смещение основного пика в спектре поглощения «Димегина» (пик Core – 395–405 нм) в красную область на 5–7 нм, снижение его интенсивности и уширение, что характерно для образования комплекса. При этом наблюдали незначительное увеличение пиков поглощения альбумина в области длин волн 250–300 нм. Данные результаты свидетельствуют о весьма быстром и эффективном образовании комплекса исследуемых соединений.

Об эффективности генерации синглетного кислорода судили по снижению интенсивности оптического поглощения в характеристическом пике используемой ловушки синглетного кислорода – триптофана [9] на длине волны 278 нм. На рис. 4 изображены зависимости изменения концентрации триптофана от времени облучения для собственно «Димегина» и комплекса «Димегин – альбумин», представляющие собой усредненное значение трех параллельных экспериментов. Оценка эффективности генерации синглетного кислорода в обоих случаях проводилась по наклону кривой в начальной точке. Для «Димегина» скорость генерации синглетного кислорода составила $5 \cdot 10^{-7}$ моль/с, для комплекса «Димегин – альбумин» – $4 \cdot 10^{-7}$ моль/с, что говорит о незначительных различиях.

Люминесценцию, возникающую в результате облучения растворов ФС, регистрировали в области длин волн 600–800 нм. Спектры люминесценции «Димегина» и комплекса «Димегин – альбумин» представлены на рис. 5. На нем можно наблюдать увеличение интенсивности люминесценции, bathochromный сдвиг и уширение пиков при комплексообразовании «Димегина» с альбумином.

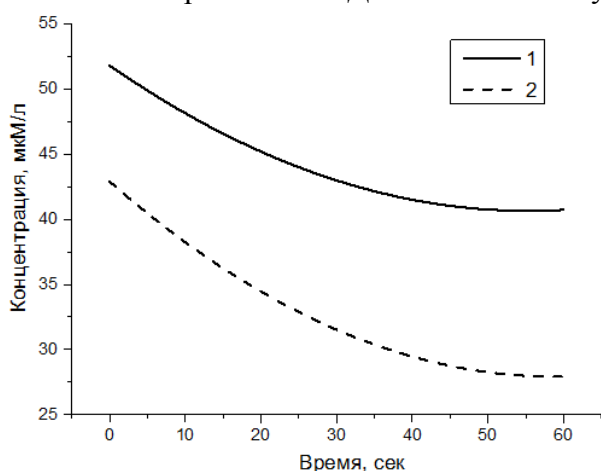


Рис. 4. Изменение концентрации триптофана в растворе «Димегина» (2) и комплекса «Димегин – альбумин» (1). Концентрация «Димегина» и альбумина в растворе комплекса – $0,5 \cdot 10^{-6}$ моль/л, концентрация триптофана – $0,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л

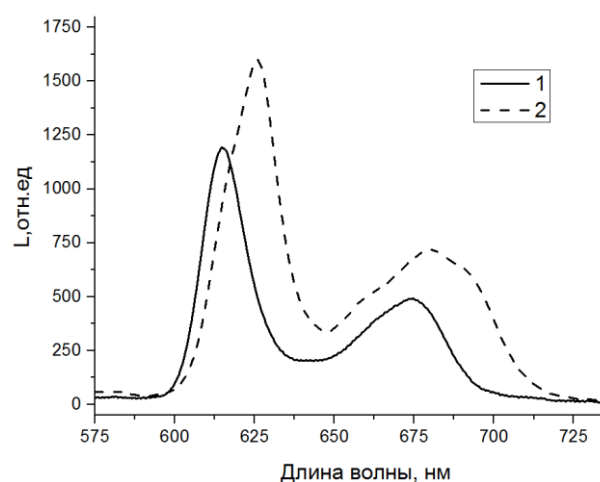


Рис. 5. Спектры люминесценции «Димегина» (1) и комплекса «Димегин – альбумин» (2). Концентрация «Димегина» и альбумина в растворе комплекса – $0,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л

Заключение

«Фотодитазин» и «Димегин», присутствуя в питательной среде в концентрации 5; 2,5 и 1 мкг/мл без последующего облучения («темновая токсичность») не оказывают явного токсического действия на нормальные фибробласты кожи человека и клетки эпителиоидной карциномы шейки матки человека.

МТТ-тест показал, что «Фотодитазин» и «Димегин» в комплексе с облучением оказывают различное токсическое действие на культивируемые клетки: при одинаковых концентрациях в составе питательной среды «Димегин» оказывает более сильное

токсическое действие на клетки, чем «Фотодитазин». ФК более чувствительны к совместному действию «Димегина» и облучения, чем клетки линии HeLa. Это может быть связано с тем, что клетки постоянных трансформированных линий, более устойчивы, чем клетки первичных культур.

Квантовый выход генерации синглетного кислорода ФС «Димегина», полученный в водном растворе, является схожим с квантовым выходом генерации синглетного кислорода «Фотодитазина» (0,6), хотя по предварительным исследованиям наблюдалась значительная разница по эффективности генерации синглетного кислорода между этими двумя ФС [2]. Такой результат мы связываем с тем, что вода является очень активным «тушителем» синглетного кислорода и для получения более точного результата в дальнейшем необходимо использовать растворители, не влияющие на данный параметр. Квантовый выход флуоресценции получился высоким, что может свидетельствовать об эффективном использовании «Димегина» во флуоресцентной диагностике. Малая степень фоторазрушения «Димегина» подтвердилась и является очень хорошим показателем для ФС, поскольку при проведении терапии не потребуется вводить данный ФС в организм пациента в больших количествах.

Полученные результаты по изучению фотофизических свойств «Димегина» в присутствии альбумина свидетельствуют о незначительных различиях скорости генерации синглетного кислорода растворами. Незначительное снижение эффективности генерации синглетного кислорода комплексом не оказывает существенного влияния на процесс генерации в целом, из чего можно заключить, что основное свойство «Димегина» как ФС не ухудшается при системном введении.

Увеличение интенсивности люминесценции комплекса «Димегин – альбумин» может свидетельствовать об уменьшении агрегации молекул ФС при его образовании, что положительно скажется на эффективности проведения фотодинамической терапии и флуоресцентной диагностики.

Публикации

1. *Dadeko A.V.* The Effect of albumin on the photophysical properties of dimegin photosensitizer // *Optics and Spectroscopy*. 2016. Vol. 121. No 6. P. 823–825.
2. *Dadeko A.V., Murav'eva T.D., Starodubtsev A.M., Belousova I.M.* Study of the photophysical properties of a water-soluble photosensitizer of porphyrin nature-dimegin // *Journal of Optical Technology* - 2016, Vol. 83, No. 3, pp. 193–196
3. *Dadeko A.V., Murav'eva T.D., Belousova I.M.* Photophysical properties of porphyrin photosensitizers // *International Conference Laser Optics (LO)*. 2016. P. S254.
4. *Дадеко А.В., Муравьева Т.Д., Стародубцев А.М., Горелов С.И., Добрун М.В., Багров И.В., Белоусова И.М., Пономарев Г.В.* Фотофизические свойства фотосенсибилизаторов порфириновой природы // *Biomedical Photonics*. 2015. № S1. С. 10–11.
5. *Dadeko A.V., Murav'eva T.D., Starodubtsev A.M., Gorelov S.I., Dobrun M.V., Kris'ko T.K., Bagrov I.V., Belousova I.M., Ponomarev G.V.* Photophysical properties of porphyrin photosensitizers // *Optics and Spectroscopy*. 2015. Vol. 119. No 4. P. 633–637.
6. *Дадеко А.В. и др.* Фотофизические свойства фотосенсибилизаторов порфириновой природы // *Оптика и спектроскопия*. 2015. Т. 119. С. 617–622.

Литература

1. *Горелов С.И. и др.* Исследование фотофизических свойств димегина и его доклинические испытания // *Фотодинамическая терапия и фотодиагностика*. 2014. Т. 3. № 2. С. 18.
2. *Дадеко А.В. и др.* Фотофизические свойства фотосенсибилизаторов порфириновой природы // *Оптика и спектроскопия*. 2015. Т. 119. С. 617–622.
3. Патент 2276976 Российская Федерация. Фотосенсибилизатор и способ его получения / Г.В. Пономарев, Л.Д. Тавровский, А.М. Зарецкий, В.В. Ашмаров. Опубл. 27.05.06.

4. Orlova M.A. et al. Effect of the ^{67}Zn isotope on leukemic cells and normal lymphocytes // Russian Chemical Bulletin. 2012. Vol. 61. No 2. P. 405–408.
5. Kim S. et al. Photochemistry of singlet oxygen sensor green // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2013. Vol. 117. No 45. P. 13985–13992.
6. Гуринович Г.П. и др. Спектроскопия порфиринов // Успехи физических наук. 1963. Т. 79. С. 198.
7. Naveenraj S., Anandan S. Binding of serum albumins with bioactive substances. Nanoparticles to drugs // *Journal of Photochemistry and Photobiology. C: Photochemistry Reviews*. 2013. Vol. 14. P. 53–71.
8. Красновский А.А. Фотодинамическое действие и синглетный кислород // Биофизика. 2004. Т. 49. № 2. С. 305–321.
9. Жиентмаев Т.М. и др. Влияние плюронинов на фотокаталитическую активность водорастворимых порфиринов // *Высокомолекулярные соединения. Серия А. Физика полимеров*. 2009. Т. 51. № 5. С. 757–767.



Дородников Николай Александрович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: nucleofag@gmail.com

ОЦЕНКА УРОВНЯ РИСКА В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ПОВЕДЕНИЯ В МОМЕНТ АТАКИ

Н.А. Дородников

Научный руководитель – профессор С.А. Арустамов

Цель представленной работы – количественная оценка уровня риска информационной безопасности в локальных вычислительных сетях (ЛВС).

В рамках выполнения данного исследования был разработан способ описания и моделирования ЛВС, предложена универсальная модель ЛВС и ее математическое представление. Разработан генетический алгоритм, реализующий задачу оптимизации безопасности ЛВС в целом и ее элементов по отдельности. Предложены алгоритмы расчета параметров информационной безопасности ЛВС, а также подходы к подбору их конфигурации с целью получения необходимого уровня защищенности и противодействия угрозам информационной безопасности на этапе проектирования.

В работе используется понятие квазиподсети как способа описания топологии сети (подробнее об этом – в других статьях [1]), а также – понятие деревьев атак.

Метод расширенных деревьев атак

В работе используются понятие квазиподсети как способа описания топологии сети (подробнее в [1]) и понятие деревьев атак (для анализа воздействий на информационные системы), которое начало применяться достаточно давно.

В литературе также встречаются понятия «графы атак», «деревья ошибок» и «деревья риска», которые, по сути, являются синонимами. Дерево атак представляет собой

визуализацию зависимости действий, которые должен совершить злоумышленник, чтобы достичь определенной цели. В качестве корневого узла (вершины дерева) выступает основная цель, которую предполагает достичь нарушитель. Каждый узел в дереве представляет собой промежуточную цель, достижение которой позволяет нарушителю перейти на более «высокий» уровень по отношению к основной цели. Достижение корня означает, что злоумышленник успешно реализовал задуманную атаку.

Применение деревьев атак для исследования аспектов безопасности оправдано прежде всего их высокой наглядностью и подразумевает знание сценариев, по которым может пойти злоумышленник, чтобы достичь определенных целей, а это значит, что аналитикам и проектировщикам становятся видны конкретные узкие места системы, которые нуждаются в дополнительной защите или информационной изоляции [2]. Фактически деревья атак позволяют вручную структурировать потенциальные угрозы и в некоторых случаях даже определять их относительные важности, а также ввести численные характеристики.

Отношения композиций подцелей в деревьях атак традиционно бывают двух видов:

- композиция «И» означает, что должны быть достигнуты все подцели данного узла;
- композиция «ИЛИ» означает, что для достижения узловой цели должна быть достигнута хотя бы одна из подцелей.

В качестве первой предложенной модификации деревьев атак будет введение еще одной композиции – «УИ» (Упорядоченное «И»), которая означает, что цель достижима не просто, когда выполнены все подцели, но когда они выполнены в строго определенном порядке.

Поведение системы в момент атаки – случайный, вероятностный процесс. Иными словами, нельзя точно утверждать, что «система будет взломана за X секунд», но можно доказать, что «вероятность того, что система будет взломана за X секунд, есть $0,4$, а с увеличением X стремится к единице». В связи с этим была предложена еще одна модернизация – внедрение в дерево атак вероятностей реализации угроз.

Вероятность $P(t)$ реализации данной угрозы (для каждого конкретного узла дерева атак), где $t = 0$ означает момент достижения злоумышленником данной подцели.

Помимо этого, опционально указывается временной интервал атакующего действия $TimeLimit(subtree)$ для поддеревьев дерева атак.

И, наконец, вводится уровень сложности атакующего действия $Complexity(a)$, означающий относительную сложность реализации конкретного действия для злоумышленника. Значения $Complexity$ являются относительными числами и проявляются при анализе подцелей определенной цели: если у цели «А» есть три подцели с разными $Complexity$, связанные отношением «И», то при выполнении «В» и «С» цель «А» можно считать достигнутой на:

$$\frac{(ComplexityB + ComplexityC)}{\sum_{i \in \{A,B,C\}} Complexityi}$$

$Complexity$ может зависеть от предполагаемого времени достижения цели, технических средств злоумышленника и его осведомленности об атакуемых компонентах сети, а также (в некоторых случаях) от параметров оборудования. При композиции «ИЛИ» злоумышленнику логично пробовать атакующие действия с узлов с минимальным $Complexity$ на каждом уровне, поэтому именно они могут подлежать первичной оптимизации. Если $Complexity$ одинаковые или не заданы, приоритеты всех подцелей считаются идентичными.

Дерево атак с возможными композициями «УИ», сопоставлением $P(t)$ для каждого узла, а также опциональными значениями $TimeLimit$ и $Complexity$ для поддеревьев и узлов, назовем расширенным деревом атак.

Деревья атак сами по себе описывают пути достижения целей злоумышленниками. Расширенные деревья атак приносят туда возможность оценивания динамики достижения целей по времени. В то же время и цели, и подцели являются физическими действиями над

каким-то оборудованием или на каком-то хосте. Например, просканировать порты указанного хоста, произвести *DDoS*-атаку на определенный маршрутизатор, установить вредоносное ПО на конкретный сервер. Иными словами, каждое действие, атакующее или разведывательное, относится к определенному узлу квазиподсети. А само дерево атак описывает взаимодействие злоумышленника с элементами исследуемой сети или ее составляющими.

При исследовании внутренних атак (изнутри сети) предполагается, что внутри сети уже есть зараженный узел, от которого распространяется атака. А при внешних атаках злоумышленник взаимодействует только с корневым маршрутизатором (все листья дерева атак указывают именно на него), и только после его заражения каким-либо способом атака распространяется по какой-то ветке дерева атак, имея на этот момент уже полное сходство с внутренней атакой. Поэтому при наличии $P(t)$ для узла дерева атак и связи его с конкретным элементом квазиподсети допустимо считать, что этот элемент атакован с вероятностью:

$$P_H(t) = P(t).$$

При наличии нескольких узлов дерева атак, ссылающихся на один и тот же элемент квазиподсети:

$$P_H(t) = 1 - \prod_i (1 - P_i(t)),$$

в случае когда отсчет времени идет от одного и того же значения. Сопоставление узлов дерева атак с элементами квазиподсети будет использоваться для введения формулы риска, поскольку ущерб зависит от критичности элемента.

При вводе информации от пользователя квазиподсеть формируется как общая карта всей сети, включая топологию, критичности узлов, наборы связанных параметров и прочее.

Далее автоматически генерируются деревья атак по следующим принципам.

1. Выбираются все варианты целей атаки: все хосты и серверы (обозначаются **ХОСТ**). В будущем опционально пользователь сможет задать конкретные цели, которые он желает проверить.

2. Для каждой из целей атаки планировалось строить три дерева угроз: по доступности, целостности и конфиденциальности. Однако при разработке алгоритма построения этих деревьев оказалось неясным, каким образом выделить угрозы целостности в отдельное дерево, поэтому для каждой цели строится два дерева:

- а) дерево угроз конфиденциальности;
- б) дерево угроз доступности+целостности.

3. Получаются по два дерева для каждой цели **ХОСТ**, и каждый узел этих деревьев снабжен функцией вероятности $P(t)$ реализации конкретно этой угрозы, где момент времени $t = 0$ для каждой подцели отражает момент, когда злоумышленник «добрался» до нее. Вид функций $P(t)$ зависит от дерева атак и параметров оборудования, которые могут быть как подлежащие поиску в контексте оптимизации защищенности сети, так и быть заданными пользователем для проведения аудита.

4. Различие между внутренней и внешней атаками заключается в том, что для внутренней атаки листья дерева атак (откуда злоумышленник начинает свое действие) находятся где-то внутри сети, а для внешней – листья относятся к корневному маршрутизатору.

Сгенерированные деревья атак анализируются путем моделирования действий нарушителя.

Выведение функции уровня риска информационной безопасности

При рассмотрении дерева атак маленькими буквами ($a, b \dots$) обозначаются его листья (непосредственно действия, выполняемые злоумышленником), большими жирными

(**A, B...**) – подцели и главная цель. В случае, когда неважно, рассматриваются листья, цели или подцели, используется обозначение θ .

Для каждого из листьев есть функция вероятности проведения атаки: $P_a(t), P_b(t), \dots$. Время $t = 0$ привязывается к моменту, когда злоумышленник «проникает» на заданный узел, а это может произойти лишь через какое-то время после начала атаки.

Использование композиции «УИ» с двумя листьями: в момент начала атаки $T = 0$ злоумышленник начинает выполнять действие a , но к действию b приступит только после выполнения a . Обозначим этот момент времени за T_a . При $t < T_a$ действие b не выполнялось, а после T_a вероятность выполнения b нужно считать как $P(t - T_a)$.

В связи с этим, вводится обозначение:

$$P_{\theta}^*(t, T_0) = \begin{cases} 0, & t < T_0, \\ P_{\theta}(t - T_0), & t \geq T_0, \end{cases}$$

$$P_{\theta}^*(t) = P_{\theta}^*(t, 0).$$

Через $T_{p_0}(P_{\theta}^*)$ обозначается решение уравнения $P_{\theta}^*(T) = p_0$.

При наличии *Complexity* на определенном уровне везде, кроме композиции «ИЛИ», вместо вероятностей берутся взвешенные вероятности, то есть:

$$P_a(t) \approx P_a(t) \cdot \frac{Complexity_a}{\sum_{i \in \{a, b, c, \dots\}} Complexity_i}$$

При наличии $TimeLimit(\mathcal{Q}) = T_1$ для определенных поддеревьев накладывается еще ограничение на время. Например,

$$P_A(t) = \begin{cases} P_a^*(t) \cdot P_b^*(t, T_{0.5}(P_a^*)) \cdot P_c^*(t, T_{0.5}(P_b^*)) \dots, & \hat{t} < T_1 \\ P_A(T_1) & \hat{t} \geq T_1' \end{cases}$$

где $A, a, b, c, \dots \in \mathcal{Q}$, а $\hat{t} = 0$ означает момент выполнения какой-то из подцелей, впервые приведшей к $P_{\theta} > 0$, $\theta \in \mathcal{Q}$.

Таким образом, поскольку для каждой цели строится по два дерева атак – доступности и конфиденциальности – существует возможность расчета вероятностей $P_{Хост}^{КОНФ}(t)$ и $P_{Хост}^{ДОСТ}(t)$ достижения корневых целей в каждом дереве.

Численное значение риска вычисляется для конкретного дерева атак. Риск есть безразмерная величина, определяемая на конкретный период времени. На этапе ввода информации пользователь указывает критичность элементов сети, в том числе хостов, которые являются целями деревьев атак. Поэтому у цели каждого дерева атак есть указанное значение критичности.

В связи с этим риск можно вычислить по стандартной формуле:

$$R = P * C,$$

где P – вероятность неблагоприятного исхода, равна $P_{Хост}$, а C – приносимый ущерб при реализации угрозы равен $CR_{Хост}$:

$$R_{ЦЕЛЬ} = P_{Хост} * CR_{Хост}.$$

Поскольку $P_{Хост}$ – вероятность достижения корневой цели, то она учитывает все функции вероятности $P(t)$ подцелей и непосредственных атакующих действий, которые прямым образом как раз и зависят от параметров оборудования и экспертных оценок [3]. Поэтому риск также косвенно зависит от всех параметров сети.

Выражение $R = P * C$ описывает риск конкретного дерева атак. Для квазиподсети генерируются множество деревьев атак (для каждого хоста – по доступности и конфиденциальности). А поскольку полный риск – это сумма индивидуальных рисков отдельных классов, то вводятся следующие обозначения:

$$R_{\text{доступности}} = \sum_{i \in \text{хосты}} P_{\text{ХОСТ}i}^{\text{дост}} * CR_i,$$

$$R_{\text{конфиденциальности}} = \sum_{i \in \text{хосты}} P_{\text{ХОСТ}i}^{\text{конф}} * CR_i -$$

как суммарные показатели рисков всей сети по доступности и конфиденциальности, а также полный риск как:

$$R_{\text{полный}} = R_{\text{доступности}} + R_{\text{конфиденциальности}}.$$

Поскольку в качестве множителей ущерба выступают заданные пользователем критичности, при указании допустимых рисков они задаются в тех же условных масштабных единицах, что и критичности.

Заключение

Основным результатом проведенного исследования является изучение и структурирование информации в области информационной безопасности вычислительных сетей, а также разработка методов количественной оценки уровня риска информационной безопасности локальных сетей и их сегментов на основе предложенной модификации метода деревьев атак, использующей вероятностный подход.

Область возможного применения и практическая значимость данного исследования заключается в том, что разработанные теоретические положения были реализованы в виде набора математических расчетов по оценке уровня риска, построению моделей действий нарушителя, а также по оценке динамики состояния сети. Они могут быть применены в государственных и коммерческих организациях для оценки уровня рисков их информационной безопасности, а также при проектировании или модернизации их локальных сетей, что способствует существенному увеличению эффективности применяемых организационных и технических мер по защите информации. Теоретическая значимость исследования заключается в том, что разработанные способы моделирования поведения сети в момент атаки и изменения ее состояния, а также методы количественной оценки уровня рисков информационной безопасности дополняют и развивают существующие разделы теории информационной безопасности.

Полученные материалы научно-технического исследования могут быть использованы как в научной деятельности для дальнейших изысканий на тему информационной безопасности локальных сетей, так и в учебных процессах для подготовки специалистов среди сотрудников ИТ-подразделений в организациях и в процессе обучения студентов соответствующих специальностей.

Публикации

1. Дородников Н.А., Ботвинкин П.В., Филиппова Ю.Г. Методы и алгоритмы автоматизации обеспечения безопасности сетевых ресурсов с использованием гетерогенных платформ // Сборник трудов III Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2014. С. 40–42.
2. Дородников Н.А., Филиппова Ю.Г., Арустамов С.А., Гатчин Ю.А. Автоматизация процессов обеспечения безопасности сетевых ресурсов в гетерогенных ЛВС // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Йошкар-Ола, 2014. С. 265–269.
3. Дородников Н.А., Безбородов Л.А., Арустамов С.А., Дородникова И.М. Разработка математической модели универсальной ЛВС с учётом требований информационной безопасности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 115–117.
4. Дородников Н.А. Разработка алгоритмов количественного расчета параметров модели универсальной ЛВС в момент противодействия угрозам информационной безопасности // Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга. СПб., 2016. С. 73–77.

5. Дородников Н.А., Арустамов С.А. Разработка вероятностной поведенческой модели для защиты вычислительной сети с использованием деревьев атак // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 960–962.

Литераура

1. Дородников Н.А. и др. Разработка математической модели универсальной ЛВС с учетом требований информационной безопасности // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 115–117.
2. Дородников Н.А. и др. Методы и алгоритмы автоматизации обеспечения безопасности сетевых ресурсов с использованием гетерогенных платформ // Сборник трудов III Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2014. С. 40–42.
3. Дородников Н.А. и др. Методы и алгоритмы оптимизации параметров элементов ЛВС при их проектировании // Вопросы защиты информации. Москва. 2016. № 1. С. 74–78.



Евстигнеев Максим Игоревич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: maksim269@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ В НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ СРЕДАХ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

М.И. Евстигнеев

Научный руководитель – доцент Ю.В. Литвинов

Применение мобильного робота для обследования определенного пространства связано с использованием дальномеров и систем технического зрения. Однако на фотоизображении отсутствует информация о дистанции до препятствия [1–3]. Также существуют проблемы оценки рабочего пространства целиком, локализации мобильного робота в нем и картографирования среды, что необходимо для построения пути движения мобильного робота. Это связано с тем, что фотоизображения предметов, сделанные с различных позиций, отличаются друг от друга [1–3].

Для преодоления этих сложностей в задаче автоматической навигации робота нужно использовать алгоритмы, обрабатывающие части объектов, изображения которых мало изменяются в зависимости от ракурса. На их основании можно создать достаточно точную карту глубины пространства, позволяющую эффективно обходить препятствия. Концепция технического зрения дает возможность определять положение робота в пространстве, а также препятствия заранее неизвестной формы без предустановленной карты территории. Использование систем видеокamer позволяет находить границы объектов и вычислять расстояние до них [4, 5].

Стандартными проблемами объектно-ориентированной автоматической обработки изображений у мобильного робота являются определение границ объектов, препятствий и стандартных образов. Наиболее трудная из них – исследование изображений в обстоятельствах априорной неопределенности содержания. Для решения этой проблемы

применяются многоцелевые способы структурного анализа, которые дают возможность значительно уменьшить вычислительную нагрузку в процессе обработки информации и повысить эффективность работы мобильного робота в ситуациях малой предсказуемости и с ограниченными вычислительными ресурсами [6, 7].

Поиск и сопоставление особенностей изображений происходит путем сравнения выбранной части изображения с сохраненной, для чего определяется следующая нормированная сумма квадратной разности [8, 9]:

$$C = \frac{\sum \left[\frac{g_1 - \bar{g}_1}{\sigma_1} - \frac{g_0 - \bar{g}_0}{\sigma_0} \right]^2}{n} \quad (1)$$

где g_0 и g_1 – значения интенсивности изображения в сохраненной области и области на изображении соответственно, \bar{g}_1 , \bar{g}_0 , σ_1 и σ_0 – стандартные средние отклонения интенсивности в областях, а n – число пикселей. Это выражение имеет нулевое значение при идеальном соответствии изображений исследуемой области в разных кадрах и отличное от нуля, если существует разница. Выражение (1) нормализовано по отношению к общим изменениям интенсивности изображения за весь период времени, в течение которого система должна работать. Необходимо иметь в виду, что при работе с двумя камерами условия освещенности могут изменяться, и в режиме стереозрения изображения будут несколько отличаться. Лучшее (наименьшее) значение C , найденное в области поиска, принимается как соответствие, если оно лежит ниже порогового значения, устанавливаемого вручную. Однако очевидно, что успешные соответствия можно ожидать только при определенных движениях мобильного робота, так как локальные области выглядят по-разному, если смотреть с другого ракурса.

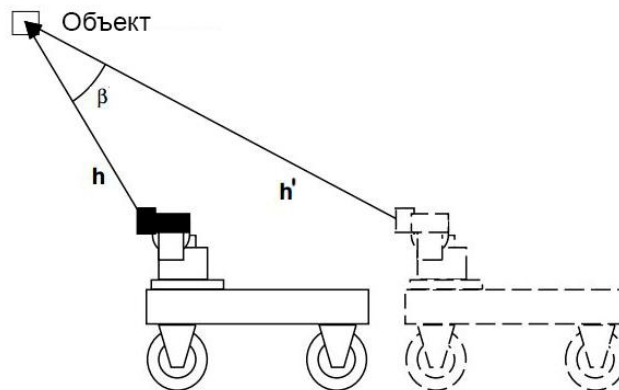


Рис. 1. Координаты объекта вычисляются на основании разности расстояний и угла между новой точкой зрения и той, с которой он был виден изначально

На рис. 1 показаны положения робота, где h' – вектор из центра системы технического зрения к локальному признаку, когда он был инициализирован, и h – вектор из центра системы технического зрения нового положения мобильного робота. Локальная область, как ожидается, будет видима, если отношение длин $\frac{|h|}{|h'|}$ стремится к единице, а угол $\beta = \arccos\left(\frac{hh'}{|h||h'|}\right)$ стремится к нулю. Локальные признаки, которые не совпадают в пределах области, должны быть удалены. Тем не менее проблема такого подхода заключается в том, что исследуемые области часто отдаляются от своей первоначальной позиции. Небольшая ошибка при определении местоположения на каждом шаге, в том числе в результате ограничений пикселизации, может привести к большому сдвигу области за много шагов. Важно, чтобы основные ориентиры являлись стационарными объектами.

Существующие подходы глобального описания изображений, используемые при локализации мобильных роботов и построении карты местности, позволяют судить об общей структуре изображений и могут эффективно использоваться при сравнении изображения с существующей выборкой [10], но имеют недостатки в виде плохой чувствительности к аффинным преобразованиям, что не позволяет использовать их для локализации робота в пространстве.

Подходы, основанные на локальных признаках, анализируют отдельные выбранные фрагменты изображения и содержат информацию только о них [11, 12]. Одним из недостатков данных алгоритмов является большое количество выявляемых ключевых точек. И при наличии ракурсных или яркостных искажений, а также аберраций объектива подавляющая часть сопоставлений является ошибочной [13, 14].

Для повышения точности корректной локализации робота в работе необходимо агрегировать локальные сопоставления в группы. Ошибочные сопоставления можно уменьшить, учитывая пространственное положение больших групп локальных признаков. Корректные сопоставления локальных признаков будут подвергаться взаимным аффинным преобразованиям и агрегироваться в группы. Затем, учитывая достаточно большие группы, возможна эффективная оценка траектории мобильного робота. Также возможна эффективная оценка динамической среды с использованием только агрегированных групп.

При оценивании перемещения мобильного робота из прошлого положения в настоящее происходит анализ двух стереоизображений и поиск на них ключевых точек одновременно для всех пар изображений. Так как параметры стереокамер априори известны, то, учитывая эпиполярную геометрию, можно восстановить координаты ключевой точки.

Задача отслеживания траектории движения мобильного робота из одного положения в другое сводится к оцениванию преобразований систем координат двух множеств ключевых точек в разных позициях. Положение мобильного робота определяется относительно своих начальных координат и ориентиров, найденных при его передвижении.

Так как рассматривается одно и то же множество координат точек из пары систем координат нескольких положений мобильного робота, то можно решить задачу вычисления аффинного преобразования и восстановить параметры, характеризующие положение мобильного робота в пространстве.

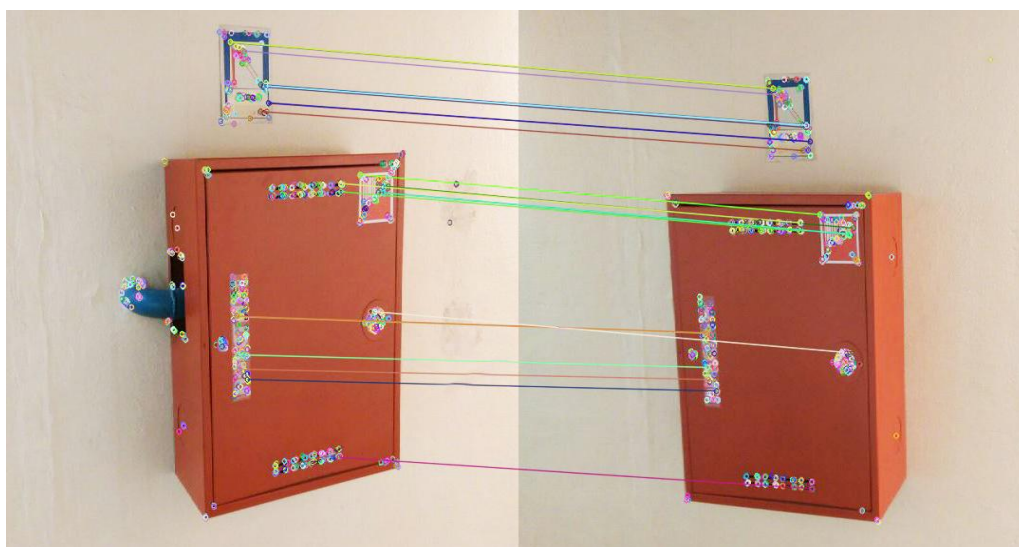


Рис. 2. Сопоставления агрегированных групп ключевых точек

На рис. 2 показаны результаты работы алгоритма по сопоставлению фотографий объемных предметов при агрегации ключевых точек. По сравнению с базовым подходом этот способ имеет лучшую производительность (что важно для мобильных систем) и эффективен при использовании в недетерминированной изменяемой среде.

Для исследования возможностей работы алгоритмов и оценки их эффективности при перемещении мобильного робота между двумя точками на площадке 5 x 5 м с расположенными на ней препятствиями без предварительного картографирования были сделаны серии снимков. Для сравнения алгоритмов использовались такие характеристики, как отклонение от эталонной траектории, длина траектории и время выполнения задания (Таблица). Для нахождения ключевых точек использовался алгоритм *SURF*.

Таблица

Результаты экспериментов

Метод распознавания препятствий	Дескриптор	Отклонение от эталонной траектории	Длина траектории	Время выполнения задания
УЗ-датчики	SURF	0,30	4,19	42
Эпиполярная геометрия	SURF	0,26	4,07	31
Агрегирование ключевых точек	SURF	0,17	3,06	19,9

Результаты экспериментов свидетельствуют об увеличении эффективности выполнения заданий мобильным роботом в случае использования разработанного модифицированного метода учета связей ключевых точек, основанного на анализе локальных признаков изображений. Помимо этого, имеются возможности улучшения результатов за счет нахождения и удаления областей, неустойчивых к ракурсным искажениям.

Публикации

1. *Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Мищенко Г.М.* Алгоритмы управления четырехколесным роботом при движении по пересеченной местности // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 738–741.
2. *Мазулина В.В., Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Сусский И.А.* Управление движением мобильного робота с использованием системы технического зрения // Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени. 2014. Т. 4. № 4. С. 36–38.
3. *Евстигнеев М.И., Гао Л., Литвинов Ю.В., Лазаревич А.А., Лазаревич А.А., Мазулина В.В., Мищенко Г.М., Фролов С.В., Фролов С.Н., Литвинов Ю.В.* Организация движения мобильного робота в заданную точку с учётом препятствий // Материалы X Международной научно-практической конференции «Наука и технологии: шаг в будущее – 2014». Т. 34. Прага, 2014. С. 40–45.
4. *Мищенко Г.М., Евстигнеев М.И., Лазаревич А.А., Гао Л., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Щаев Е.Г.* Управление мобильным роботом на траектории с препятствием // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в образовании и науке». Т. 16. Тамбов, 2013. С. 38–40.

Литература

1. *Евстигнеев М.И., Литвинов Ю.В., Мазулина В.В., Мищенко Г.М.* Алгоритмы управления четырехколесным роботом при движении по пересеченной местности // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 738–741.
2. *Евстигнеев М.И., Гао Л., Литвинов Ю.В., Лазаревич А.А., Лазаревич А.А., Мазулина В.В., Мищенко Г.М., Фролов С.В., Фролов С.Н., Литвинов Ю.В.* Организация движения мобильного робота в заданную точку с учётом препятствий // Материалы X Международной научно-практической конференции «Наука и технологии: шаг в будущее – 2014». Т. 34. Прага, 2014. С. 40–45.
3. *Караваяев Ю.Л., Трефилов С.А.* Дискретный алгоритм управления по отклонению мобильным роботом с омниколесами // Нелинейная динамика. 2013. Т. 9. № 1. С. 91–100.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

4. Литвинов Ю.В. и др. Использование веб-камеры для обнаружения препятствий на пути движения мобильного робота // Системы обработки информации. Информационные проблемы теории акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем. 2013. № 7 (114). С. 24–26.
5. García M.A., Solanas A. 3D simultaneous localization and modeling from stereo vision // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings. ICRA '04. 2004. Vol. 1. P. 847–853.
6. Луцке В.Р. Автоматический анализ изображений. Объектно-независимый структурный подход. Саарбрюккен, 2011. – 316 с.
7. Малашин П.О. Сопоставление изображений трехмерных сцен с помощью кластеризации сопоставленных локальных признаков посредством преобразования Хафа // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 6. С. 34–42.
8. Dissanayake G. et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001. Vol. 17. No 3. P. 91–110.
9. Liu Y., Zhang H. Visual loop closure detection with a compact image descriptor // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 1051–1056.
10. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. Vol. 2. Washington DC, 1999. P. 1150–1157.
11. Ortiz R., Vandergheynst P. FREAK: Fast Retina Keypoint // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2012. P. 510–517.
12. Csurka G. et al. Visual categorization with bags of keypoints // ECCV Workshop on Statistical Learning for Computer Vision. 2004. Vol. 1. No 22. P. 1–22.
13. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 60. No 2. P. 91–110.
14. Малашин П.О. Сопоставление изображений трехмерных сцен с помощью кластеризации сопоставленных локальных признаков посредством преобразования Хафа // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 6. С. 34–42.



Елистратов Вячеслав Дмитриевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем
E-mail: vdelist@corp.ifmo.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ НОРМЫ H_∞ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОСИ ТЕЛЕСКОПА ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ «САЖЕНЬ»

В.Д. Елистратов

Научный руководитель – доцент А.Г. Ильина

Цель проекта – создание робастной системы управления электроприводом азимутальной оси телескопа траекторных измерений (ТТИ) «Сажень» на основе ограничения нормы H_∞ , подавляющей как внешние помехи (ветровая нагрузка), так и внутренние возмущения, вызванные параметрической и структурной неопределенностью объекта

управления. Исследования проводились в области управления двухмассовым объектом с низкой резонансной частотой, обладающим параметрической неопределенностью.

В ходе работы была проведена структурная и параметрическая идентификация электропривода ТТИ «Сажень» и его механической нагрузки. В качестве регулятора выбран регулятор на основе ограничения нормы H_∞ . Вид структурной схемы системы управления, включающей в себя регулятор и объект управления, представлен на рис. 1.

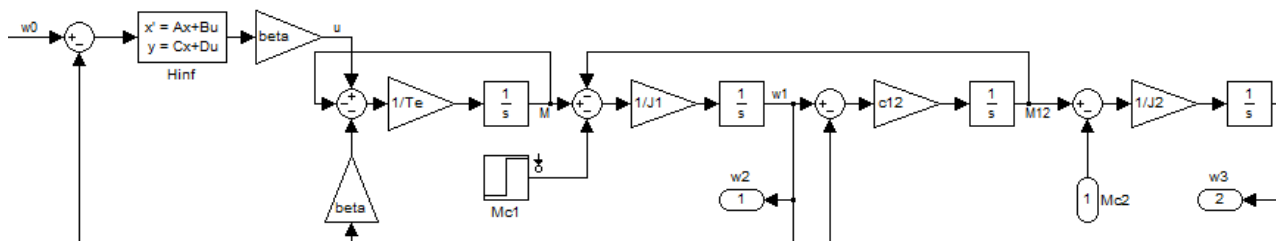


Рис. 1. Система управления с ограничением нормы H_∞

С целью упрощения алгоритма синтеза регулятора ТТИ «Сажень» будет представлен двухмассовым объектом – первая масса это электромеханический преобразователь, а вторая – нагрузка на вал двигателя (угломестная и альт-азимутальная оси). Математическая модель такой системы выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = -\frac{1}{T_e}M + \frac{\beta}{T_e}(\omega_0 - \omega_1), \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1}M - \frac{1}{J_1}M_{12} - \frac{1}{J_1}M_{c1}, \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}\omega_1 - c_{12}\omega_2, \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2}(M_{12} - M_{c2}). \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 2 представлена структурная схема, соответствующая системе уравнений (1).

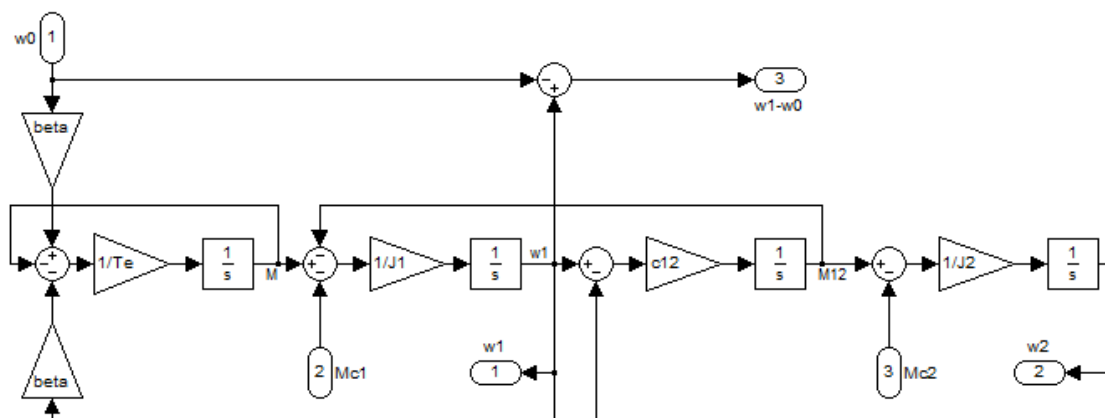


Рис. 2. Двухмассовая модель ТТИ «Сажень» с дополнительным сигналом ошибки скорости

Для построения регулятора необходимо знать численные значения параметров двухмассовой системы, что неизбежно приводит нас к задаче параметрической идентификации объекта управления. Для этого я воспользуюсь тремя способами:

- параметрической идентификацией параметров электромеханического преобразователя с помощью MATLAB/System Identification Toolbox;

- параметрическая идентификация моментов инерции масс будет проведена с помощью 3D-модели ОПУ в SolidWorks;
- жесткость связи масс будет вычислена на основе резонансной частоты колебания, значение которой будет получено благодаря моделированию в Ansys.

С помощью параметрической идентификации средством MatLab/System Identification Toolbox при известном значении электромагнитной постоянной – $T_e = 10^{-3}$ (с) – были получены следующие значения:

$$\begin{cases} \beta = 16 \pm 2, \\ J_{\Sigma v} = 3,9 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2), \end{cases}$$

где $J_{\Sigma v}$ – сумма моментов инерции первой и второй массы при положении азимутальной оси в вертикальном положении.

С помощью 3D-моделирования ОПУ (опорно-поворотного устройства) в системе SolidWorks получены следующие значения момента инерции первой массы и моментов инерции второй массы в зависимости от положения нагрузки азимутальной оси:

$$\begin{cases} J_1 = 0,524, \\ J_{2v} = 3,376, \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \\ J_{2g} = 3,168. \end{cases}$$

Жесткость скручивания вала, соединяющего обе массы, определялась на основании значения резонанса крутильных колебаний вала азимутальной оси, значение которого получено с помощью модального анализа, проведенного в Ansys: 374 Гц [1]. Значение жесткости при этом будет составлять $c_{12} = 2,5 \cdot 10^6$ (Нм).

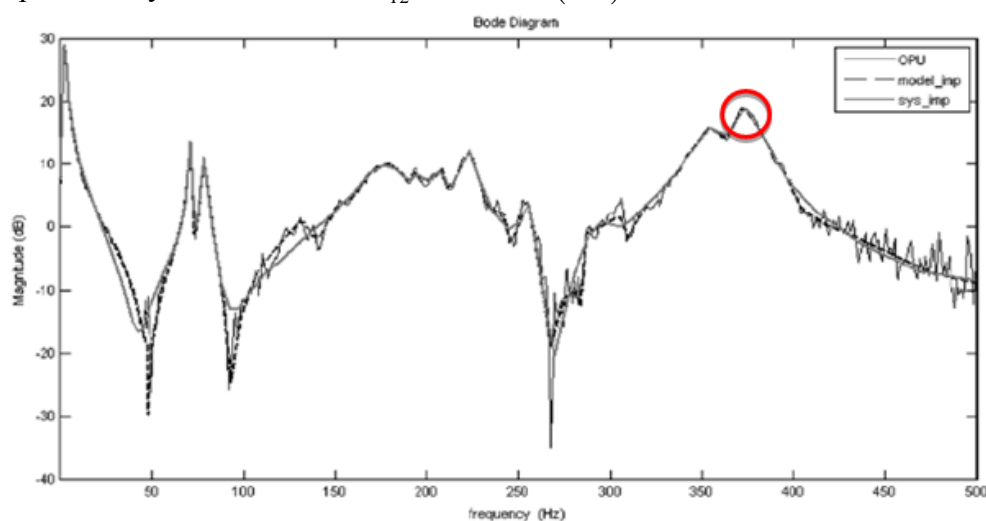


Рис. 3. АЧХ ТТИ «Сажень», полученная в результате моделирования в Ansys. Резонансная частота кручения выделена кругом

Моделирование параметрической неопределенности

В полученной модели существует неопределенность двух величин:

$$\begin{cases} \beta = 16 \pm 2 \\ J_2 = 3,272 \pm 0,104 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) \end{cases}$$

Эти неопределенности необходимо учесть в структурной схеме двухмассовой модели. Алгебраически учтем неопределенность параметров следующим образом: $x \Rightarrow x(1 + p_x \delta_x)$,

где x – номинальное значение, p_x – максимальное отклонение от номинального (например, для момента инерции второй массы оно будет составлять 0,104), δ_x – показатель отклонения величины от номинальной в данный момент времени, по модулю не превышающий единицы. Полученную алгебраическую модель необходимо преобразовать для введения неопределенности в структурную модель двухмассовой системы. Для этого воспользуемся линейным дробным преобразованием [2], которое трансформирует элементарные усилители (звенья «gain» в *MatLab*) в схему с неопределенным значением коэффициента усиления:

$$\beta(1 + p_\beta \delta_\beta) \Rightarrow \begin{bmatrix} y_\beta \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \beta \\ p_\beta & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\beta \\ \omega_0 - \omega_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{J_2(1 + p_{J_2} \delta_{J_2})} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_{J_2} \\ v_{J_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_{J_2} & \frac{1}{J_2} \\ -p_{J_2} & \frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{J_2} \\ x_3 - M_{c2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь первый элемент результирующего вектора – выходное значение после усиления, второй – сигнал, подающийся на блок неопределенности; первый элемент входного вектора – сигнал воздействия неопределенности, второй – сигнал, нуждающийся в усилении. На рис. 4 показана структурная схема объекта управления с неопределенностями.

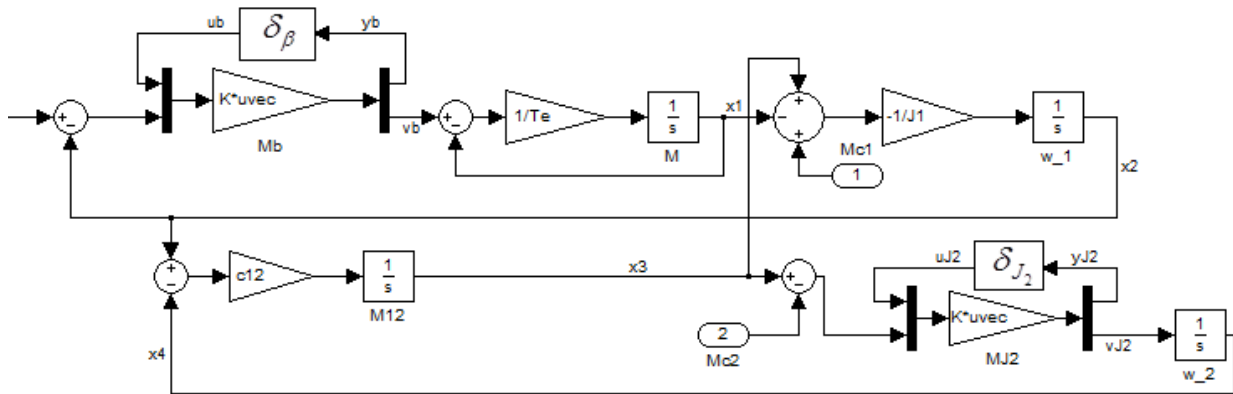


Рис. 4. Детализированная структурная схема с реализацией дробно-рационального преобразования параметров с неопределенностью

Синтез регулятора

H_∞ -регулятор будем рассчитывать по методу 2-Риккати [3]. Для этого необходимо представить объект управления в виде «пространство-состояние», объединив системы (1), (2) и (3) в одну:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ y_\beta \\ y_{J_2} \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_e} & -\frac{\beta}{T_e} & 0 & 0 & \frac{p_\beta}{T_e} & 0 & \frac{\beta}{T_e} & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & c_{12} & 0 & -c_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 & -p_{J_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_2} \\ 0 & -\beta & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 & -p_{J_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ u_\beta \\ u_{J_2} \\ U \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Системе (4) соответствует обобщенная модель объекта управления в *Simulink* (рис. 5):

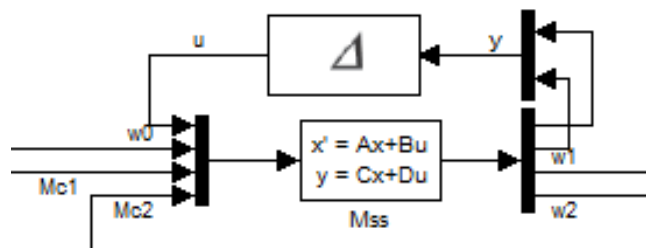


Рис. 5. Обобщенная модель объекта управления в *Simulink*

Здесь $\|\Delta\|_{\infty} = \left\| \begin{bmatrix} \delta_{\beta} & 0 \\ 0 & \delta_{J_2} \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \leq 1$, как это требуется для соблюдения неравенства

норм [4]. Тогда матрицы состояния H_{∞} -регулятора будут вычисляться на основе решения двух уравнений Риккати, соответствующих двум Гамильтоновым матрицам. Полученные матрицы регулятора не будем приводить из-за их громоздкости (регулятор ожидаемо имеет шестой порядок) [5].

Результаты эксперимента с применением полученного регулятора

В качестве стендового объекта используется прототип ТТИ «Сажень», имеющийся в распоряжении кафедры ЭТиПЭМС Университета ИТМО. Стенд управляется с помощью ПК, программное обеспечение которого позволяет контролировать объект с применением *MatLab*. Результат использования H_{∞} регулятора показан на рис. 6.

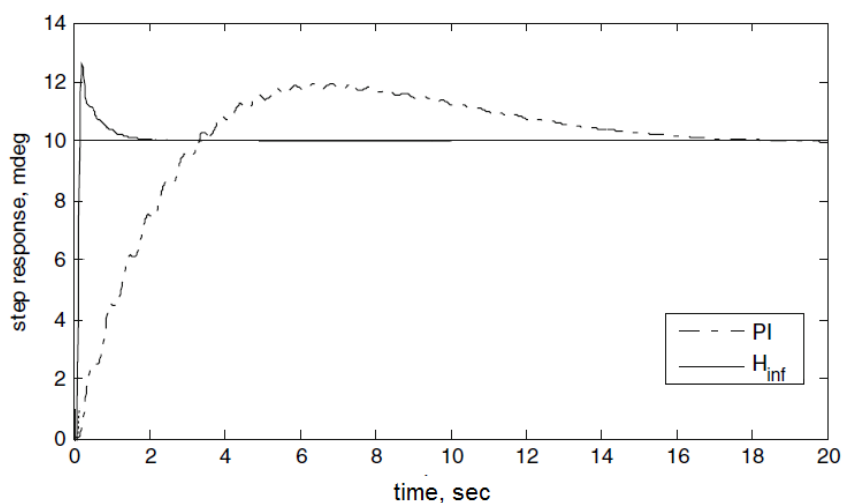


Рис. 6. Реакция замкнутых систем с ПИ-регулятором и с H_{∞} -регулятором на ступенчатое изменение задающего воздействия

Заключение

В ходе выполнения данной работы был проведен синтез H_{∞} -робастного регулятора для системы управления ОПУ ТТИ «Сажень». Представлены алгоритмы моделирования параметрических неопределенностей и расчета матриц состояния регулятора. Для ТТИ «Сажень» на их основании были рассчитаны матрицы состояния H_{∞} -робастного регулятора, который впоследствии показал высокие динамические и точностные характеристики на макете ТТИ «Сажень» кафедры ЭТиПЭМС Университета ИТМО.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– задача нахождения H_{∞} -робастного регулятора главным образом упирается в задачу построения корректной математической модели объекта управления, а во вторую очередь определяется весовыми функциями контролируемых величин;

- полученный регулятор обладает астатизмом первого порядка по задающему и возмущающему воздействию;
- H_∞ -робастный регулятор обеспечивает высокое быстродействие при неизменном перерегулировании. Величина быстродействия определяется возможностями энергетической подсистемы привода;
- применение данного регулятора оправдано во всех случаях, где экономически или по техническим требованиям целесообразно использовать микропроцессорные системы управления, которыми и будет синтезироваться данный регулятор.

Публикации

1. Елистратов В.Д., Ильина А.Г. Робастное управление прецизионным электроприводом азимутальной оси телескопа траекторных измерений «Сажень» с ограничением нормы H_{inf} [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/4022/4022.pdf> (дата обращения: 02.12.2016).
2. Елистратов В.Д., Ильина А.Г. Робастное управление прецизионным электроприводом азимутальной оси телескопа траекторных измерений «Сажень» с ограничением нормы H_{inf} // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2016. Т. 1. С. 155–159.

Литература

1. Ильина А.Г. Следящий электропривод системы наведения квантово-оптического комплекса: дис. канд. техн. наук. СПбГУ ИТМО, СПб., 2010. – 169 с.
2. Gu D.W. et al. Robust control design with MATLAB®. Springer, 2005. – 389 p.
3. Gawronski W. Modeling and control of antennas and telescopes. Springer, 2008. – 228 p.
4. Zames G. Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses // IEEE Transactions on Automatic Control. 1981. Vol. 26. No 2. P. 301–320.
5. Doyle J.C. et al. State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1989. Vol. 34. No 8. P. 831–847.



Жуков Михаил Валерьевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра нанотехнологий и материаловедения
e-mail: cloudjyk@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ЗОНДОВЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИПАТИТА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БОЛЕЗНИ АОРТАЛЬНОГО СТЕНОЗА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

М.В. Жуков

Научный руководитель – профессор А.О. Голубок

Цели проекта: создание, исследование и апробация новых специализированных зондов на основе гидроксипатита, предназначенных для детального изучения механизма
Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

формирования отложений гидроксиапатита в аортальных полулуниях сердечного клапана методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).

В течение последних лет в России наметился рост количества больных пожилого возраста с кальцинозом клапана аорты. Несмотря на повышенный интерес к этой проблеме процессы формирования депозитов солей кальция в структурах аортального клапана остаются в полной мере недостаточно изученными. В настоящее время доказано участие в регуляции отложения фосфатов кальция более 30 различных биологически активных соединений белковой или неорганической природы, ряда фенотипически измененных клеток, а также мембранно-везикулярных структур [1–3].

Известно, что при $pH > 4,2$ единственным термодинамически стабильным фосфатом кальция в водном растворе является гидроксиапатит (ГА) [4], который идентифицируется чаще в депозитах солей кальция артерий человека [3, 5]. Перспективным является применение метода АСМ, позволяющего изучать локальные топологические и адгезивные параметры образцов на требуемом микро- и наноуровне. При этом количественные экспериментальные данные по измерению адгезионных характеристик эндотелиального и субэндотелиального слоев аортальных полулуний в отношении фосфатов кальция в доступной литературе отсутствуют.

Для решения этой проблемы разработан новый тип зондовых датчиков на основе гидроксиапатита (ГА) кальция, который позволяет изучить механизм формирования первичного «ядра» злокачественных отложений гидроксиапатита в межзубчатой ткани аортальных полулуний.

Создание ГА-зондов и последующее изучение клапанов сердца происходило на сканирующем зондовом микроскопе *Ntegra Aura* (NT-MDT, Россия) в контактной и полуконтактной модах АСМ. Контроль полученных ГА-зондов и исследование депозитов солей кальция осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) *Inspect* (FEI, США). Адгезивные свойства эндотелия и субэндотелиальных структур клапана аорты были изучены на десяти клапанах аорты и стенках корня аорты. Материалы образцов были предоставлены сотрудниками Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова.

Создание зондов с ГА проходило в несколько этапов.

1. Фрагментация отложений гидроксиапатита кальция до состояния порошка с частицами субмикронных размеров.
2. Нанесение капли УФ-отверждаемого клея на очищенную Si подложку.
3. Нанесение клея на вершину зонда путем его перемещения к капле клея.
4. Перенесение частицы на зонд с помощью метода АСМ.
5. Контроль закрепления ГА-частицы на вершину зонда с применением метода СЭМ.

Контроль результатов переноса депозитов ГА на вершины зондовых датчиков проводился с помощью метода СЭМ сразу после его закрепления в СЭМ. Характерные изображения зондов с ГА до и после переноса представлены на рис. 1. По результатам исследований выявлено, что использование притупленных зондов позволяет облегчить процесс закрепления ГА-частиц и снизить инвазивность метода.

Исследование топографических свойств эндотелиальной и субэндотелиальной областей аортальных полулуний проходило в полуконтактной силовой моде для повышения устойчивости зондов, а также для уменьшения разрушающего воздействия зонда на образец. Исследование поверхности проводилось на внешней (эндотелиальной) и внутренней (субэндотелиальной) областях (рис. 2а, 2б). Следует отметить, что из-за высокой влажности и адгезии внутренней части клапана к зонду отображение топологии поверхности внутренней области клапана, представляющей собой структуру коллагеновых волокон в субэндотелиальной области, было затруднено.

Установлено, что наиболее часто встречающиеся неровности лежат в диапазоне 30–60 нм, что, вероятнее всего, представляет собой выступающие над поверхностью ядра эндотелиоцитов. Начиная с размеров изображения (области сканирования) 15x15 мкм

шероховатость поверхности стабилизируется и составляет около 180 нм. Максимальный разброс по высоте, который определялся по крупным выступам материала на поверхности клапана, составил значения до 3–5 мкм.

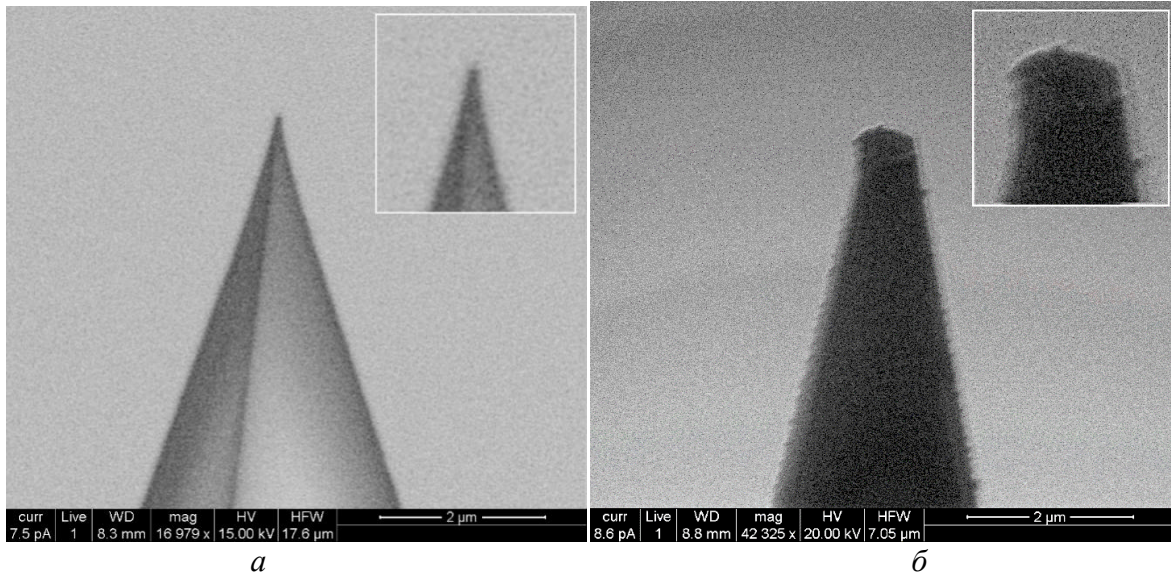


Рис. 1. СЭМ изображение зонда: а – до; б – после переноса ГА

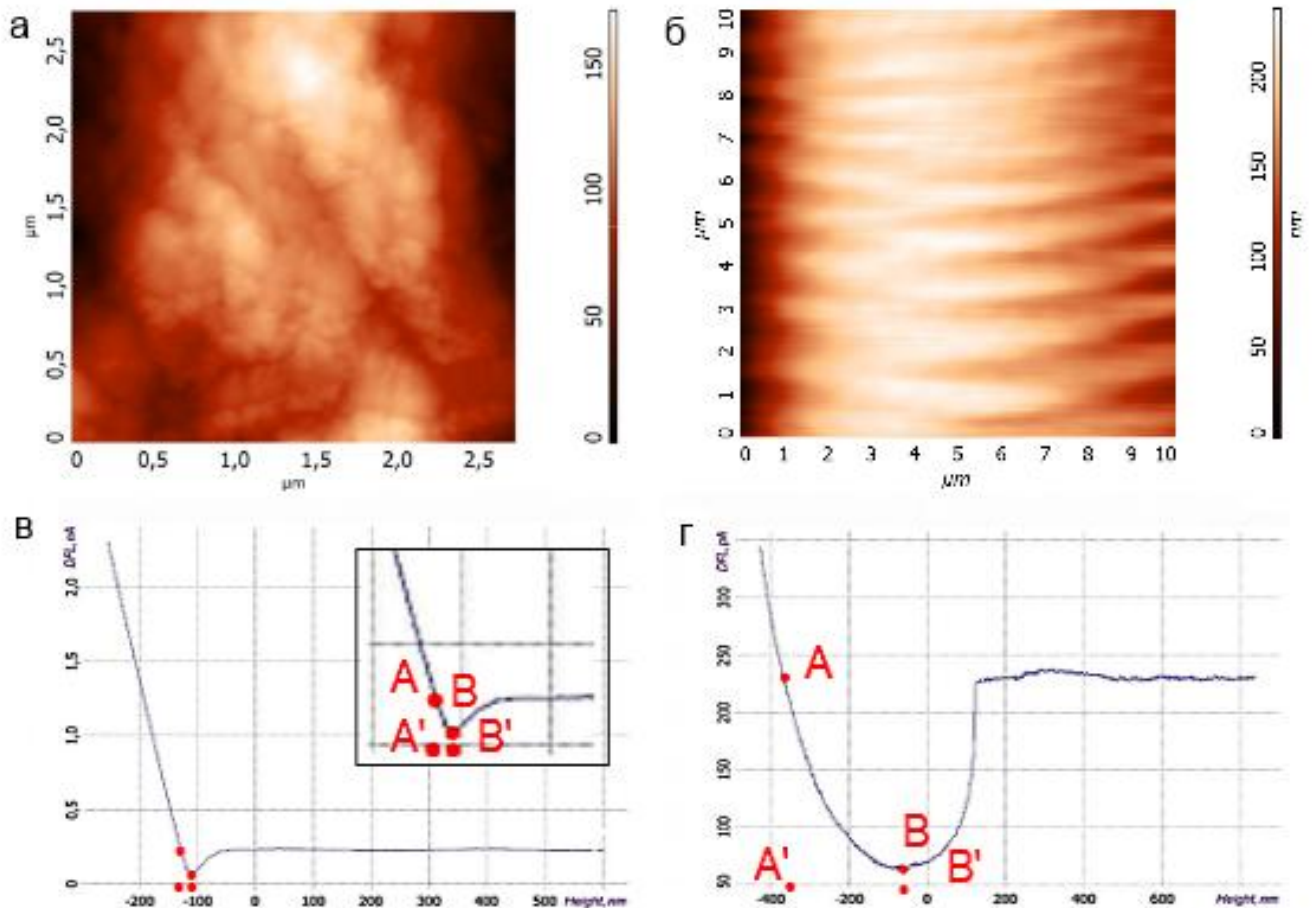


Рис. 2. АСМ-изображения: а – эндотелия аортальных полулуний; б – субэндотелиального слоя. Характерные кривые отвода, полученные при АСМ: в – на эндотелии; г – субэндотелиальном слое аортального клапана специализированными ГА-зондами

Изучение адгезивных свойств аортального клапана к специализированным зондам на основе ГА проводилось в состоянии образца, близкого к нативному (образец находился во влажном состоянии). Сила адгезии определялась на участке кривой отвода (рис. 2в, 2г), отвечающей за прилипание зонда к поверхности образца (отрезок АВ на кривых отвода). Отклонение зонда, обусловленное силами адгезии, определялось по длине проекции отрезка АВ на ось X (отрезок А'В'). Анализ кривых отвода в момент отлипания в области неповрежденного эндотелия (рис. 2а) составил значение $Z = 22,5 \pm 2,5$ нм, что соответствует средней силе адгезии 56,7 нН (рис. 2в). Отклонение кантилевера в момент отлипания от субэндотелиального слоя (рис. 2б) составило $Z = 300 \pm 20$ нм, средняя сила адгезии 850 нН (рис. 2г). Кривые адгезии имели высокую степень совпадения при многократных исследованиях различных участков сердечного клапана.

Таким образом, степень адгезии субэндотелиального слоя в отношении гидроксиапатита существенно (более чем в 14 раз) превышает адгезию эндотелия, что указывает на потенциальную возможность формирования первичного «ядра» солей кальция в межклеточном веществе аортальных полулуний.

На основе данных по измерению кривых адгезии на внешней и внутренней областях клапана, выявлено существенное ее увеличение на внутренней области клапана (на порядок), что говорит о возможном образовании ГА в данной области. По совокупности наблюдений можно утверждать, что одним из механизмов формирования массивных отложений ГА является образование сферических микро- и наночастиц, представляющих собой единый конгломерат. Результаты исследований говорят о пригодности использования разработанных специализированных зондов на основе ГА для моделирования процессов образования злокачественных кальцийсодержащих структур на стенках сердечного клапана.

Заключение

В рамках выполнения проекта проведена разработка, исследование и апробация специализированных зондовых датчиков на основе гидроксиапатита кальция. Изучены топологические и адгезионные характеристики эндотелиальной и субэндотелиальной областей аортальных полулуний.

Высказаны предположения о патогенетической значимости полученных результатов в развитии кальцинированного аортального стеноза. Результаты исследований свидетельствуют об эффективности использования разработанных специализированных зондов на основе гидроксиапатита для моделирования процессов формирования кальцийсодержащих элементов в структуре сердечного клапана.

Публикации

1. Zhukov M.V., Gulyaev N.I., Golubok A.O. Specialized probes based on hydroxyapatite calcium for heart tissues research by atomic force microscopy // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1748. P. 020010.
2. Жуков М.В., Гуляев Н.И., Голубок А.О. Зонды с гидроксиапатитом кальция для исследования сердечного клапана методом атомно-силовой микроскопии // Биология и фундаментальная медицина в Санкт-Петербурге: материалы совещания Объединенного научного совета СПбНЦ РАН. СПб., 2016. С. 112–114.
3. Zhukov M.V., Gulyaev N.I., Golubok A.O. Specialized nanoprobe based on hydroxyapatite calcium for heart tissues research by atomic force microscopy // V International Scientific Conference STRANN 2016: abstracts. 2016. P. 137–139.

Литература

1. Агеев Ф.Т. и др. Механизмы формирования кальцификации артерий // Кардиологический вестник. 2012. Т. 7. № 2. С. 57–64.

2. *Efstratiadis G. et al.* Coronary calcification in patients with end-stage renal disease: a novel endocrine disorder // *Hormones*. 2007. Vol. 6. No 2. P. 120–131.
3. *Prieto R.M. et al.* Study on the structure and composition of aortic valve calcific deposits: etiological aspects // *Journal of Biophysical Chemistry*. 2011. Vol. 2. No 1. P. 19–25.
4. *Вересов А.Г. и др.* Химия неорганических биоматериалов на основе фосфатов кальция // *Российский химический журнал*. 2004. Т. XLVIII. № 4. С. 52–64.
5. *Пухов Д.Э. и др.* Микроморфология, состав, особенности локализации минеральных отложений створок аортальных клапанов по данным сканирующей электронной микроскопии и рентгенодифракционного анализа // *Вестник Национального медико-хирургического Центра им. Н.И. Пирогова*. 2014. Т. 9. № 1. С. 23–30.



Клюкин Дмитрий Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптоинформационных технологий и материалов
E-mail: kliukinda@gmail.com

СОЗДАНИЕ ОПТОВОЛОКОННОГО ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СТЕКЛА С ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Д.А. Клюкин

Научный руководитель – профессор А.И. Сидоров

Цель работы – разработка оптоволоконного термометра на основе стекла, содержащего редкоземельные ионы Sm^{3+} , Tb^{3+} и Eu^{3+} , а также молекулярные кластеры (МК) серебра, которое обладает люминесценцией в видимой области спектра.

Температура – один из основных параметров любой системы. Для контроля температуры используются термометры различного типа: ртутные, спиртовые, полупроводниковые, термопары, пирометры и т. д. Применение того или иного типа термометров вызвано условиями окружающей среды, в которой производятся измерения, необходимой точностью, а также температурным интервалом. Однако зачастую выдвигаются еще более жесткие требования, такие как физическая удаленность измерителя от места измерения, а также измерение температуры в условиях больших электромагнитных полей. Простым примером служит трансформаторная подстанция, которая находится во многих дворах в каждом городе. Использование оптоволоконной техники позволяет проводить измерения при сильных электромагнитных шумах. Известно, что в последние годы все самолеты оборудуются оптоволоконными линиями связи, для того чтобы обезопаситься от пагубного действия молний. Очевидно, что увеличение точности таких приборов – актуальная задача.

На данный момент принцип работы большинства существующих оптоволоконных термометров основан на принципе работы пирометра. Приходящее от измеряемого объекта излучение сравнивается с излучением от нити накала. Это позволяет использовать кварцевое оптоволокно, обладающее наиболее высокой температурой плавления. Однако точность такого прибора составляет ± 3 градуса. Использование люминесцентных стеклянных волокон может увеличить его чувствительность.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

В данной работе будут исследованы стекла, содержащие редкоземельные ионы Sm^{3+} , Tb^{3+} и Eu^{3+} и молекулярные кластеры серебра Ag_n . Известно, что редкоземельные ионы обладают малым сечением поглощения. Однако их можно сенсibilизировать, правильно подобрав донора, имеющего большее сечение поглощения. Таким донором могут служить молекулярные кластеры серебра Ag_n , которые сами обладают интенсивной люминесценцией, а также способны усиливать люминесценцию редкоземельных ионов.

Для проведения экспериментов по созданию оптоволоконного термометра, использовались фото-термо-рефрактивные стекла следующей системы: $\text{Na}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{NaF}-\text{NaCl}$ с добавкой Ag_2O (0,12 мол. %), Sb_2O_3 (0,04 мол. %), CeO_2 (0,01 мол. %), Eu_2O_3 (0,5 мол. %). Варка таких стекол происходит при 1500 °С с последующим отжигом при температуре 490 °С. В сваренном стекле присутствуют ионы и заряженные молекулярные кластеры серебра, обладающие слабой люминесценцией в видимом и УФ-диапазоне.

Также синтезировались фторфосфатные стекла системы с $\text{SiO}_2-\text{AlF}_3-\text{PbF}_2-\text{CdF}_2-\text{ZnF}_2$ с добавкой AgNO_3 (5 мол %), SmF_3 (2 мол %) или TbF_3 (2 мол %). Синтез стекол проводился в корундовых тиглях в атмосфере воздуха при температуре 950 °С в течение 0,5–1 ч. Время и температура синтеза определялись опытным путем из условия получения стекла, прозрачного в видимой области спектра и не содержащего металлических наночастиц серебра. Фторидная матрица и ионы свинца создают ионам серебра слабую восстановительную среду.

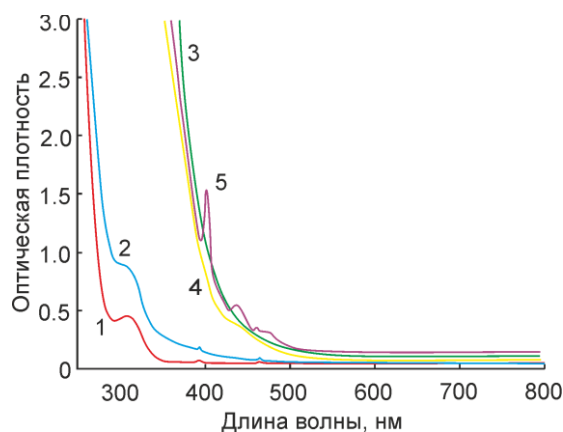


Рис. 1. Спектры оптической плотности образцов стекла: 1 – исходное силикатное стекло с Er^{3+} , 2 – силикатное стекло с МК серебра, 3 – фторфосфатное стекло с МК серебра без редкоземельных металлов, 4 – фторфосфатное стекло с МК серебра и Tb^{3+} , 5 – фторфосфатное стекло с МК серебра и Sm^{3+}

На рис. 1 показаны спектры оптической плотности образцов стекла. На спектре исходного силикатного стекла есть полоса поглощения на 309 нм, которая вызвана присутствием ионов Ce^{3+} . Они добавлены в состав специально для того, чтобы свободные электроны, образовавшиеся при облучении полосы поглощения церия УФ-излучением, могли захватываться другими компонентами стекла. В данном случае такими ионами являются Ag^+ и Sb^{5+} , которые после восстановления переходят соответственно в Ag^0 и Sb^{3+} [1]. Этот метод восстановления ионов серебра давно известен и широко используется при синтезе фоточувствительных материалов. Ионы сурьмы служат ловушками для электронов, чтобы отдать их при термической обработке ионам серебра. Как показано на рис. 1, спектры оптической плотности силикатного стекла после УФ-облучения и термической обработки приводят к образованию множества полос поглощения в УФ- и фиолетовой областях спектра. Наведенное поглощение приписывается формированию молекулярных кластеров серебра Ag_n , где $n = 1-8$ [1]. В то же время такие же кластеры формируются в фосфатных стеклах уже после синтеза. Для поставленной задачи способ формирования молекулярных кластеров серебра не имеет значения.

Одним из наиболее важных свойств молекулярных кластеров серебра является интенсивная фотолюминесценция в видимой области спектра. Максимум люминесценции обычно приходится на 550 нм, что дает практически белый цвет свечения. Возбуждение люминесценции молекулярных кластеров может осуществляться в области 250–410 нм [1]. На рис. 2 показаны спектры люминесценции исследуемых стекол при возбуждении длиной волны 405 нм, которая выбрана не случайно. Полупроводниковые лазеры с этой длиной волны широко используются в *Blue-ray*-приводах для записи и считывания информации. Поэтому источники излучения на ней стоят сравнительно дешево.

Как видно на рис. 2, спектры всех стекол имеют как широкие, так и узкие полосы люминесценции. Широкие полосы относятся к молекулярным кластерам серебра различного размера. Они уширены из-за неперриодической структуры стекла. В то время как узкие полосы относятся к 4f-4f переходам исследуемых редкоземельных ионов Tm^{3+} , Sm^{3+} и Eu^{3+} . Известно, что сечение поглощения редкоземельных металлов сравнительно мало, поэтому зачастую приходится прибегать к использованию других поглотителей излучения накачки, после чего энергия различными путями переходит к редкоземельному иону. В нашем случае поглотителем служат молекулярные кластеры серебра, у которых есть полосы поглощения в районе возбуждения, после чего происходит безызлучательный перенос энергии на редкоземельный ион, который в конечном счете генерирует квант света [2]. При этом эффективность переноса энергии определяется различными факторами, такими как расстояние от донора до акцептора, а также окружением ионов. Ранее было показано, что перенос энергии увеличивает интенсивность люминесценции Eu^{3+} до 250 раз, а Sm^{3+} и Tm^{3+} до 10 раз [2]. Для наших стекол усиление люминесценции составило 10 раз для Eu^{3+} и два раза для ионов Sm^{3+} и Tm^{3+} . Данный экспериментальный факт можно объяснить не оптимально подобранной концентрацией доноров и акцепторов. Однако этот недочет может быть устранен дополнительным синтезом стекол.

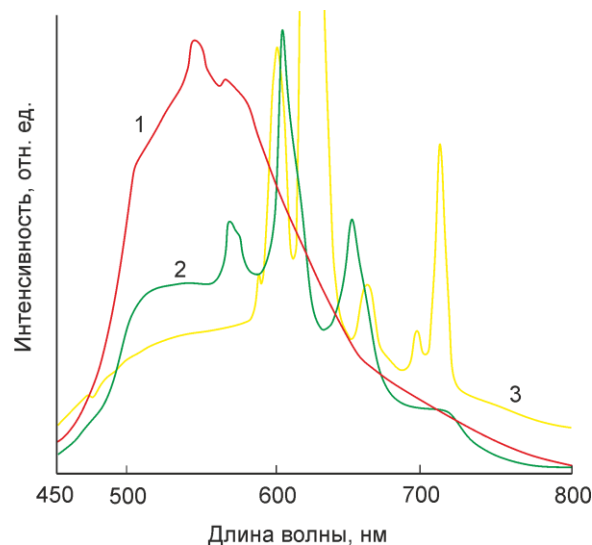


Рис. 2. Спектры люминесценции образцов: 1 – с ионами Tb^{3+} , 2 – с ионами Sm^{3+} , 3 – с ионами Eu^{3+} . Длина волны возбуждения 405 нм

Для того чтобы использовать данные люминесцентные стекла в качестве основы для датчика температуры, необходимо исследовать зависимость интенсивности люминесценции от температуры стекла. На рис. 3 показаны эти зависимости для интегральной люминесценции. Длина волны возбуждения люминесценции 405 нм. Из рисунка видно, что только стекло с ионами Sm^{3+} обладает практически линейной зависимостью, что наиболее желательно для прикладных целей. Быстрее уменьшается интенсивность люминесценции ионов Eu^{3+} . Эти результаты хорошо согласовываются с исследованиями в других материалах с добавлением редкоземельных металлов [2].

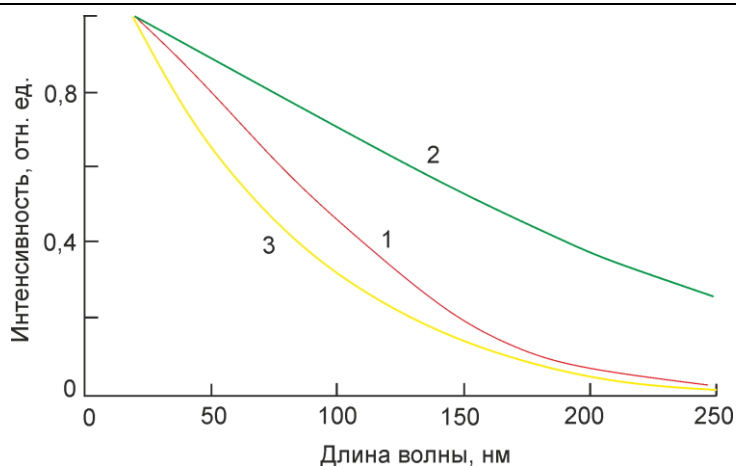


Рис. 3. Зависимость интенсивности люминесценции от температуры волокна:

1 – стекло с Tm^{3+} , 2 – стекло с Sm^{3+} , 3 – стекло с Eu^{3+}

Для создания люминесцентного датчика температуры была разработана схема, приведенная на рис. 4. На ней видно, что область, обведенная пунктиром, представляет собой короткий участок люминесцентного оптоволокна, соединенного с обычным кварцевым волокном. Далее кварцевое волокно соединяется с Y-делителем, который в свою очередь подключен к приемнику и источнику излучения. Приемником излучения является стандартный фотодиод, работающий в фотогальваническом режиме. Источником излучения служит полупроводниковый лазер с длиной волны 405 нм. Излучение от него распространяется по оптоволокну, доходя до люминесцентного волокна. При этом возбуждается люминесценция молекулярных кластеров серебра и редкоземельного иона, которая распространяется, в том числе и обратно, по оптоволокну, достигая в итоге приемника. Таким образом, интенсивность люминесценции изменяется при изменении температуры, что фиксируется на приемнике.

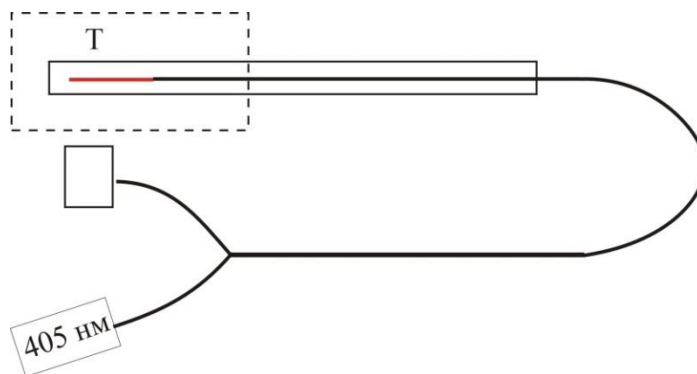


Рис. 4 Фотография волокна и схемы термометра

Данный оптоволоконный термометр можно будет использовать для измерения температуры с чувствительностью в диапазоне до 250 °С в помещениях с сильным электромагнитным полем.

Заключение

В данном проекте были разработаны и синтезированы силикатные и оксифторидные фосфатные стекла с редкоземельными ионами Sm^{3+} , Tb^{3+} и Eu^{3+} , а также ионами серебра Ag^+ . Синтезированные стекла обладают уникальными люминесцентными свойствами благодаря переносу энергии с молекулярных кластеров серебра на ионы редкоземельных металлов. При этом интенсивность люминесценции для ионов Eu^{3+} увеличивается до 10 раз и до двух раз для ионов Sm^{3+} и Tm^{3+} . Оптические волокна, изготовленные во время синтеза стекол, могут быть использованы в качестве чувствительного элемента волоконного датчика температуры, схема которого была предложена выше.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

Публикации

Klyukin D.A., Khmelev A.Y., Pshenova A.S., Sidorov A.I., Fedorov Y.K. Multicolour laser recording of optical information in silicate glasses with europium, silver and cerium ions // *Quantum Electronics*. 2016. Vol. 46. No 10. P. 930–934.

Литература

1. Dubrovin V.D. *et al.* Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // *Optical Materials*. 2014. Vol. 36. No 4. P. 753–759.
2. Eichelbaum M., Rademann K. Plasmonic enhancement or energy transfer? On the luminescence of gold-, silver-, and lanthanide-doped silicate glasses and its potential for light-emitting devices // *Advanced Functional Materials*. 2009. Vol. 19. No 13. P. 2045–2052.



Косильников Сергей Юрьевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра нанофотоники и метаматериалов
E-mail: serg.kosulnikov@phoi.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА НОВОГО ТИПА МЕТАМАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НЕУПОРЯДОЧЕННОГО МАССИВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ С ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СУБВОЛНОВОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.Ю. Косильников

Научный руководитель – доктор физико-математических наук П.А. Белов

Среда из проводов – это метаматериал, образованный с помощью плотно упакованного (с электромагнитной точки зрения) массива металлических проводов. Исследованию свойств данного типа метаматериала посвящена научная литература последних лет. К ним могут быть отнесены усиленное преобразование электрического тока из тепловой энергии [1–4], субволновая передача изображений [5], а также некоторые другие [1]. Среди примечательных свойств метаматериалов на основе среды из металлических проводов важно свойство, заключающееся в усилении излучения от субволнового электрического или магнитного диполя, погруженного непосредственно в данную среду. Эффект был подробно изучен в работах [6–9], а его качественной мерой является параметр, называемый фактором Парселла (F_p). Оптимизируя параметры метаматериала на основе среды из металлических проводов под определенную задачу, можно добиться широкополосного и весьма высокого по значению параметра F_p . Данное свойство является следствием аномальной анизотропии [6], а также сильной пространственной дисперсии рассматриваемого метаматериала.

В известных работах по исследованию фактора Парселла [6–8], данный метаматериал всегда представляется упорядоченным массивом ориентированных в одном направлении проводов, которые закрепляются в диэлектрической матрице. В предоставляемом исследовании такой тип метаматериала будет называться упорядоченной средой из проводов. Фактор Парселла бесконечной упорядоченной среды из проводов может быть

достаточно высоким [1]. Но для блока среды конечного размера (прежде всего на частотах, не соответствующих размерностным резонансам структуры) излучаемая источником энергия практически полностью запирается внутри него из-за эффекта сильнейшего внутреннего отражения [7], или же она может быть значительно поглощена внутри объема данного блока [8]. Иными словами, существует ключевое различие между так называемым радиационным фактором Парселла F_{PR} и полным фактором Парселла F_P . На микроволновых частотах потери в медных или алюминиевых проводах невелики, и эффект Парселла прежде всего определяется эффектом внутренних отражений в блоке среды из проводов. Таким образом, условие $F_{PR} \approx F_P \gg 1$ для блока среды из упорядоченных проводов конечного размера достигается только при частотах, соответствующих резонансам Фабри – Перо образца [7].

Цель и задачи проекта

Для того чтобы высвободить энергию поля диполя, запертую внутри блока среды из параллельных проводов, в работах [10] и [11] было предложено заменить параллельные провода на расходящиеся. Таким образом формируется так называемая гиперлинза на основе блока среды из металлических проводов. Конструктивная особенность гиперлинзы всегда подразумевает использование малой площади для отбора энергии в сравнении с требуемой для эффективного излучения в свободное пространство на внешней стороне структуры. Возникает вопрос: можно ли улучшить излучение в свободное пространство без увеличения площади излучающей поверхности?

Во-первых, этот вопрос важен для более детального понимания физики теплового излучения [12]. Обычные полусферические линзы [13] и гиперлинзы [10] были ранее использованы для повышения уровня теплового излучения от нагретых тел, позволяя преодолеть предел излучения абсолютно черного тела [12]. В работах [10] и [11] было показано, что условие $F_{PR} \gg 1$, которое может быть обеспечено гиперлинзой, работающей в инфракрасном диапазоне, также предполагает возможность получить уровень теплового излучения, заметно превышающий этот предел в широком диапазоне частот. Тем не менее в данных устройствах энергия эффективно излучается с поверхности (сферической в [10] и плоской в [11]), которая в обоих случаях намного превышает площадь поверхности самого излучающего тела.

Во-вторых, тот же самый вопрос имеет важное значение для радиочастотных и микроволновых применений метаматериалов. Известные гиперлинзы создают увеличенное изображение распределений субволновых полей в области внешней поверхности линзы, которая гораздо больше ее внутренней поверхности. Использование данного подхода делает невозможным передать изображение от источника, занимающего относительно широкую область поверхности, а также от него нельзя обеспечить какого-либо усиления по уровню излучения.

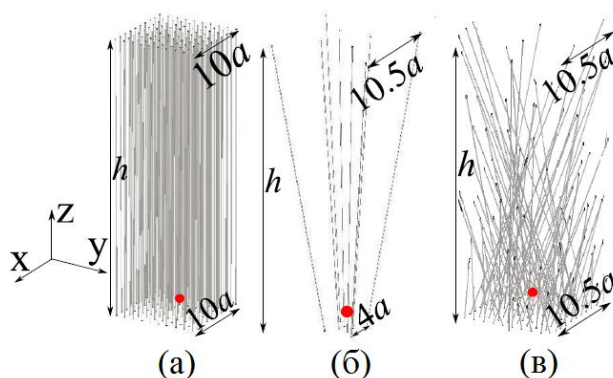


Рис. 1. Рассматриваемые образцы структур конечного размера с отмеченным расположением источника: а – упорядоченная среда из параллельных проводов; б – гиперлинза; в – блок хаотически ориентированных проводов с плоскими интерфейсами
Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

С указанной выше двойной мотивацией (фундаментальным физическим вопросом и потенциальной областью применения) в данной работе предлагается к исследованию новая структура, которая сможет сочетать некоторые преимущества гиперлинзы на основе среды из проводов, а также структурные преимущества блока параллельных проводов. Общая геометрия предлагаемого образца представляет собой блок с параллельными границами, а внутренняя его структура – набор нерегулярных, случайным образом отклоненных от основной оси направления проводов (рис. 1).

Основные результаты

Моделирование было проведено с помощью коммерческих программных пакетов *FEKO* и *CST Microwave Studio*. Для всех трех структур, показанных на рис. 1, наблюдаются огромные значения F_P (рис. 2) на частотах, соответствующих собственным Фабри – Перо резонансам, в особенности на низких частотах (в сравнении с соответствующими результатами и их объяснениями в [11]).

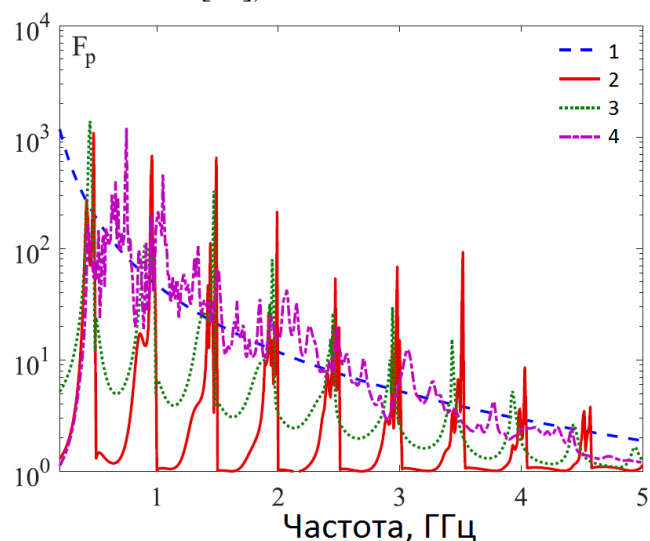


Рис. 2. Фактор Парселла в зависимости от частоты. 1 – теория для бесконечной упорядоченной среды из металлических проводов. Результаты моделирования для структур конечных размеров: 2 – регулярная среда из параллельных проводов, 3 – гиперлинза и 4 – блок хаотически ориентированных проводов (усредненное значение по девяти позициям источника)

Для блока хаотически ориентированных проводов F_P был рассчитан по девяти позициям, полученным за счет горизонтальных сдвигов источника на ma и na по осям X и Y , соответственно, от центрального положения. Здесь $m = -1, 0, 1$ и $n = -1, 0, 1$, так что источник всегда остается внутри блока достаточно далеко от его краев. На рис. 2 показана частотная зависимость $F_P(\omega)$, усредненная по этим позициям источника.

Следующим важным наблюдением (рис. 2) является увеличение количества резонансов в хаотической структуре. Важно, что этот процесс не сопровождается уменьшением их интенсивности, по сравнению с обеими опорными структурами: гиперлинзой и регулярным параллельным блоком. Третье замечание относится к локальным минимумам кривой $F_P(\omega)$, усредненным по девяти позициям источника. Здесь значения в минимумах ненамного меньше, чем в максимумах, и вся кривая лишь немного отличается от зависимости, рассчитанной для бесконечной среды из параллельных проводов.

Указанные замечания подтверждают тот факт, что хаотическую среду можно интерпретировать как набор эффективных гиперлинз, формирующих локальные участки расходящихся от источника проводов. Эффект работы гиперлинзы как таковой не является резонансным, и теперь видно, что образец может быть любой формы.

Экспериментально реализованный блок из хаотически ориентированных проводов имеет такие же габариты, как и блок регулярно ориентированных проводов. Общий вид хаотической структуры представлен на рис. 3а. Провода были отклонены на угол $\alpha = 20^\circ$, а затем повернуты вокруг нормали на случайный угол, избегая электрического контакта. Дипольный излучатель был реализован в виде медного провода общей длиной $l = 25$ мм, зазор между плечами диполя $b = 2,5$ мм (рис. 3б).

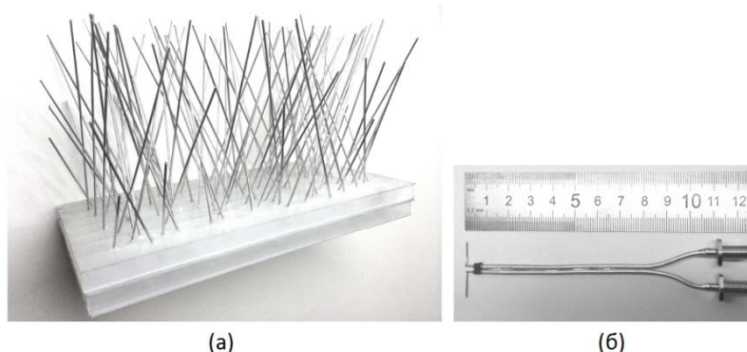


Рис. 3. Общие виды: а – блок, изготовленный на основе среды из хаотически ориентированных проводов; б – субволновой диполь

Были проведены измерения коэффициента Парселла для блоков из регулярных параллельных проводов и хаотически ориентированных. Результаты представлены рис. 4.

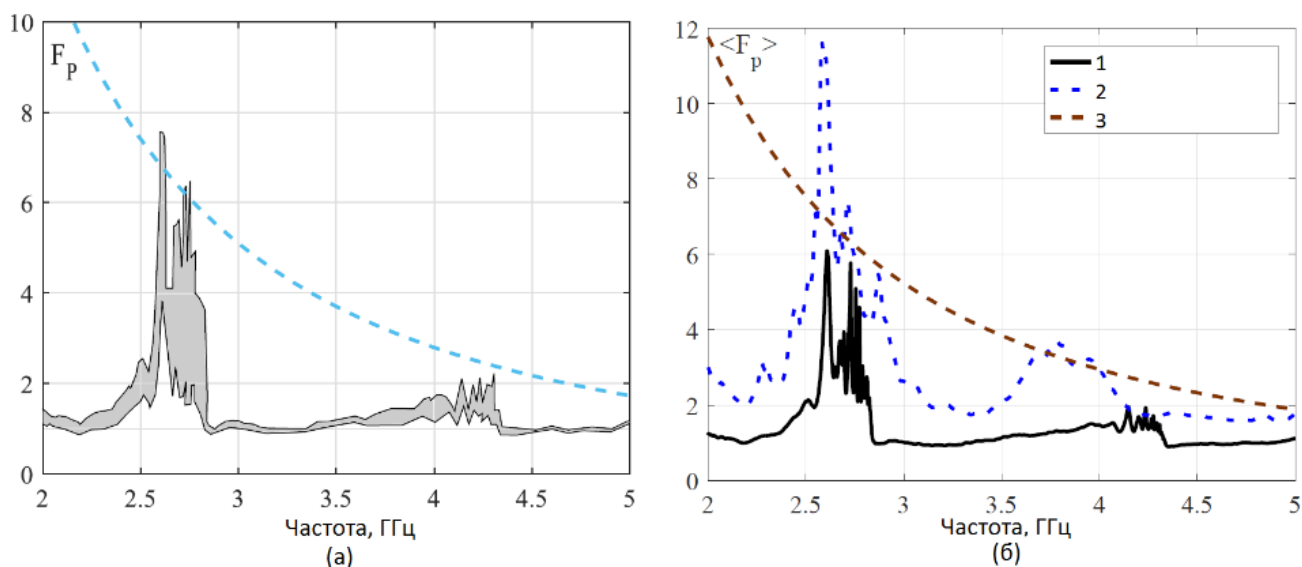


Рис. 4. Результаты измерения коэффициента Парселла: а – серым цветом отмечена область F_P в зависимости от частоты для всех возможных позиций и ориентации источника в блоке среды из параллельных проводов на глубине 5 мм внутри структуры от входного интерфейса. Пунктирная линия – теория для бесконечной среды из металлических проводов с идентичными параметрами радиуса и периода структуры; б – усредненные значения экспериментально измеренных F_P в зависимости от частоты для: 1 – структуры из параллельных проводов; 2 – хаотически ориентированных проводов; 3 – теория для бесконечной среды из параллельных проводов

Далее были рассчитаны полностью усредненные значения (по частоте, положению и ориентации антенны внутри блоков) коэффициента Парселла: для блока с параллельными проводами значение составило $F_P^{RWMS} = 1,37$; в случае использования блока с хаотически ориентированными проводами – $F_P^{RWMS} = 2,88$. Это различие является ярким подтверждением преимущества хаотической структуры перед регулярной. Прирост близок по значению к гарантированному гиперлинзой [14]. Таким образом, использование

хаотической структуры может решать те же функциональные задачи, что и гиперлинза, несмотря на наличие плоских поверхностей.

Заключение

В представленном исследовании показано, что широкополосное усиление излучения от субволновых источников возможно реализовать с помощью набора нерегулярно ориентированных металлических проводов, так что площадь поверхности, из которой излучается энергия, не увеличивается. Коэффициент Парселла предложенной нерегулярной проволочной структуры вычислялся и был проанализирован в сравнении с блоком обычной регулярной параллельно направленной среды из металлических проводов, а также в сравнении с гиперлинзой на основе блока расходящихся металлических проводов. Результаты показали, что широкополосное усиление излучения от субволнового источника в свободное пространство обеспечивается не за счет специфической общей формы образца, а из-за его внутренней нерегулярной структуры. Были сконструированы как регулярные, так и нерегулярные структуры из проводов и измерен их коэффициент Парселла. Экспериментальные исследования полностью подтвердили результаты теоретических исследований.

Публикации

1. Kosulnikov S.Y., Mirmoosa M.S., Vovchuk D.A., Tretyakov S.A., Glybovski S.B., Simovski C.R. Enhancement of radiation with irregular wire media // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2016. Vol. 64. No 12. P. 5469–5474.
2. Mirmoosa M.S., Kosulnikov S.Y., Simovski C.R. Magnetic hyperbolic metamaterial of high-index nanowires // *Physical Review B*. 2016. Vol. 94. No 7. P. 075138.
3. Mirmoosa M.S., Kosulnikov S.Y., Simovski C.R. Double resonant wideband Purcell effect in wire metamaterials // *Journal of Optics*. 2016. Vol. 18. No 9. P. 095101.

Литература

1. Simovski C.R. *et al.* Wire metamaterials: physics and applications // *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. No 31. P. 4229–4248.
2. Nefedov I.S., Simovski C.R. Giant radiation heat transfer through micron gaps // *Physical Review B*. 2011. Vol. 84. No 19. P. 195459.
3. Simovski C.R. *et al.* Optimization of radiative heat transfer in hyperbolic metamaterials for thermophotovoltaic applications // *Optics Express*. 2013. Vol. 21. No 12. P. 14988–15013.
4. Mirmoosa M.S., Simovski C.R. Micron-gap thermophotovoltaic systems enhanced by nanowires // *Photonics Nanostructures: Fundamentals and Applications*. 2015. Vol. 13. P. 20–30.
5. Belov P.A. *et al.* Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range // *Physical Review B*. 2008. Vol. 77. No 19. P. 193108.
6. Poddubny A.N. *et al.* Purcell effect in wire metamaterials // *Physical Review B*. 2013. Vol. 87. No 3. P. 035136.
7. Slobozhanyk A.P. *et al.* Magnetic Purcell factor in wire metamaterials // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. No 16. P. 161105.
8. Mirmoosa M.S. *et al.* Unbounded spatial spectrum of propagating waves in a polaritonic wire medium // *Physical Review B*. 2015. Vol. 92. No 7. P. 075139.
9. Mirmoosa M.S. *et al.* Double resonant wideband Purcell effect in wire metamaterials // *Journal of Optics*. 2016. Vol. 18. No 9. P. 095101.
10. Simovski C.R. *et al.* Hyperlens makes thermal emission strongly super-Planckian // *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*. 2015. Vol. 13. P. 31–41.
11. Kosulnikov S.Y., Simovski C.R. On Fabry – Perot resonances of a wire medium hyperlens // *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*. 2015. Vol. 15. P. 1–9.

12. *Planck M.* The theory of heat radiation. Philadelphia, 1914. – 256 p.
13. *Yu Z. et al.* Enhancing far-field thermal emission with thermal extraction // *Nature Communications*. 2013. Vol. 4. P. 1730.
14. *Kosulnikov S.Y. et al.* Wire-medium hyperlens for enhancing radiation from subwavelength dipole sources // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 63. No 11. P. 4848–4856.



Котова Екатерина Ильинична
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра световых технологий и оптоэлектроники
E-mail: eikotova@corp.ifmo.ru

ГОЛОГРАММНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИМЕТР

Е.И. Котова

Научный руководитель – профессор А.Л. Дмитриев

Цель данного научного проекта – разработка и создание компактного высокочастотного абсолютного баллистического гравиметра, в котором измерение ускорения свободного падения пробного тела производится на основе анализа сигнала биений лазерного интерферометра, содержащего объемную пропускающую голограмму, закрепленную на свободно падающем теле. При этом сигнал биений возникает в результате наложения пучков света, дифрагирующих на голограмме в нулевом и первом порядках дифракции.

К основным задачам проекта следует отнести:

1. Рассмотрение нескольких оптических схем при разработке голограммного баллистического гравиметра (ГБГ) с падающей голографической дифракционной решеткой, а именно: классической схемы интерферометра Майкельсона с использованием зеркал и светоделителя, применение призмы полного внутреннего отражения, а также схемы с двумя скрещенными голографическими решетками. Рассмотрение данных трех схем позволит оптимизировать предложенный метод и минимизировать погрешность измерений.
2. Проведение анализа влияния угловых флуктуаций положения падающей голографической дифракционной решетки на выходной сигнал биений голограммного интерферометра, а также других шумов и помех, влияющих на точность работы ГБГ.
3. Подбор оптических элементов схемы ГБГ для последующего прототипирования и изготовления опытного образца.

Принцип действия ЛБГ с голографической дифракционной решеткой

Принцип действия баллистического гравиметра заключается в измерении с помощью лазерного интерферометра расстояний, пройденных свободно падающим в вакууме пробным телом за заданные временные интервалы, и последующем вычислении значения ускорения.

Баллистические гравиметры применяются для измерений абсолютной величины ускорения силы тяжести, и их действие основано на измерении координат свободно падающего тела. Современные ЛБГ, построенные на классической схеме интерферометра

Майкельсона, отличаются высокой точностью измерений, но их усовершенствование связано с рядом принципиальных затруднений, среди которых одним из главных является большая (десятки сантиметров) длина траектории падения пробного тела [1, 2]. Сравнительно продолжительное время падения пробного тела существенно ограничивает временную разрешающую способность ЛБГ, и такие гравиметры нельзя использовать для измерения высокочастотных (ВЧ) (диапазона свыше нескольких десятков герц) колебаний напряженности гравитационного поля Земли. Между тем ВЧ-гравиметрия является важным направлением в создании гравиметрических приборов для исследования динамических процессов в ядре и коре Земли, а также аппаратуры предупреждения природных катастроф (землетрясений, оползней, цунами). Рассмотрим новый тип ЛБГ, в оптической схеме которого использована пропускающая голографическая дифракционная решетка, а длина траектории падения пробного тела составляет доли миллиметров.

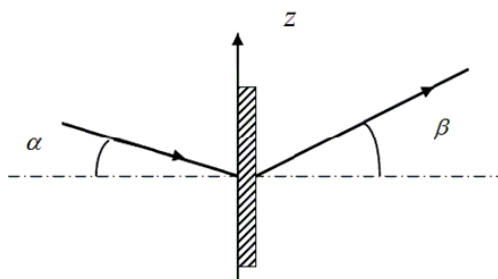


Рис. 1. Геометрия дифракции света на пропускающей голографической дифракционной решетке

Принцип действия предложенного гравиметра основан на изменении частоты света, дифрагирующего на подвижной дифракционной решетке. На рис. 1 приведена типичная геометрия дифракции плоской световой волны на пропускающей дифракционной решетке.

При перемещении голограммы вдоль оси z , частота света, дифрагирующего на ней, меняется на величину f , при этом ускорение свободного падения g связано с изменением частоты сдвига выражением:

$$g = d \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) = \frac{\lambda}{\sin \alpha + \sin \beta} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right). \quad (1)$$

Примечательно, что для расчета ускорения g , согласно (1), нет необходимости точного измерения расстояний, проходимых движущейся голографической решеткой. В баллистическом гравиметре, использующем описанный принцип измерения ускорения свободного падения, достаточно определить параметр $\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)$ регистрируемого частотно-модулированного сигнала биений.

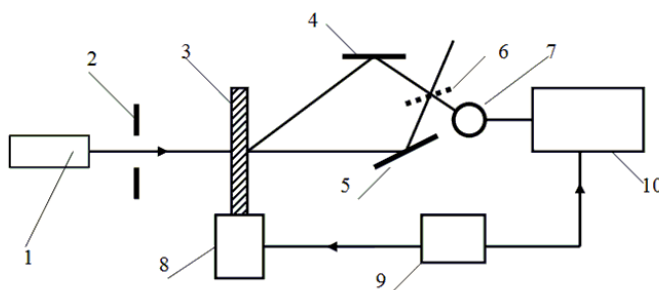


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – голограмма, 4, 5 – зеркала, 6 – светоделитель, 7 – фотодиод, 8 – электромеханическая катапульта, 9 – электронное устройство управления катапультой, 10 – цифровой осциллограф

Схема эксперимента, демонстрирующего описанный принцип измерений ускорения свободного падения пробного тела, показана на рис. 2.

Результаты лабораторных испытаний

Тестовые эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода измерений абсолютной величины ускорения свободного падения g . Пример осциллограммы сигнала биений, соответствующей восходящему участку траектории движения голограммы, показан на рис. 3.

Флуктуации амплитуды регистрируемого сигнала биений в основном обусловлены случайными вибрациями основания установки и шумами лазерного источника света. В периодическом режиме работы катапульты, благодаря накоплению и статистическому усреднению регистрируемых сигналов, точность расчета величины g значительно увеличивается.

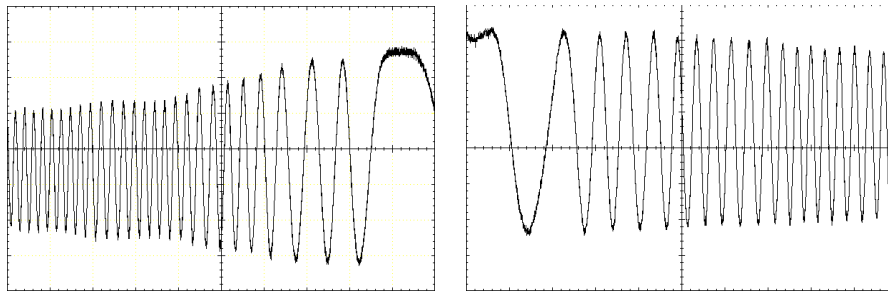


Рис. 3. Частотно-модулированные сигналы биений на выходе голограммного интерферометра, соответствующие восходящей части траектории движения пробного тела. Одно деление горизонтальной шкалы 50 мкс

Системы оптического мультиплексирования

Усовершенствования оптической системы мультиплексирования и упрощения оптико-механической конструкции гравиметра можно достичь за счет использования специальной призмы полного внутреннего отражения, описанной в [3], либо с использованием последовательно расположенных двух геометрически тождественных голограмм, одна из которых закреплена на подбрасываемом пробном теле, а другая неподвижна. Ход лучей света, последовательно дифрагирующих на двух геометрически тождественных голограммах приведен на рис. 4.

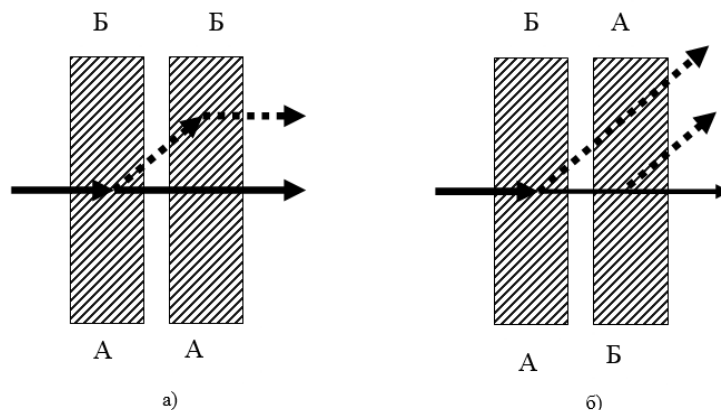


Рис. 4. Ход лучей света, последовательно дифрагирующих на двух геометрически тождественных голограммах: а – положение второй голограммы идентично положению первой; б – вторая голограмма повернута на угол 180° относительно оси, перпендикулярной плоскости падения света (угловое положение голограмм отмечено буквами «А» и «Б»)

Вследствие обратимости светового луча пучок света, падающий на вторую голограмму под углом, равным углу дифракции на первой голограмме [4], дифрагирует в направлении, параллельном направлению падающего излучения, при этом в случае *а*) положение второй голограммы идентично положению первой, и фотоприемник расположен в области интерференции дифрагирующих на голограммах пучков света; *б*) вторая голограмма повернута на угол 180° относительно оси, перпендикулярной плоскости падения света (угловое положение голограмм отмечено буквами «А» и «Б»). Сплошная стрелка указывает направление падающего на голограмму пучка света, штриховая – направление дифрагирующего пучка. На вторую голограмму падает обращенный (изменивший направление распространения на противоположное) пучок света. Ввиду конечной ширины падающего и дифрагирующего на голограмме пучков света в области их наложения они интерферируют, и при относительном движении голограмм помещенный в эту область фотоприемник фиксирует биения света на частоте, пропорциональной скорости движения голограммы.

Благодаря такому взаимному положению голограмм, вторая из них выполняет функции компактного оптического мультиплексора. В первом варианте фотоприемник располагается в области наложения пучков света, дифрагирующих на обеих голограммах, а во втором – в области наложения пучка света, прошедшего обе голограммы и дифрагирующего на второй.

Анализ источников погрешностей измерений

Основным источником ошибок измерений в ГБГ являются флуктуации $\Delta\alpha$ угла падения света на голограмму, вызванные вибрациями конструкции гравиметра и ее недостаточным вакуумированием. Учитывая крайне малую длину траектории падающей голограммы, влияние указанных факторов может быть уменьшено при усовершенствовании оптико-механической конструкции катапульты гравиметра, в том числе с использованием стабилизирующих устройств. Грубая оценка относительной погрешности измерений g имеет вид:

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + tg \frac{\beta}{2} \cdot \Delta\alpha + \frac{\Delta(\partial f / \partial t)}{(\partial f / \partial t)}, \quad (2)$$

где $\alpha \approx 0$, $\Delta\beta \approx -\Delta\alpha$. Полагая величину $\Delta\alpha$ близкой к типичной дифракционной расходимости пучка света в интерферометре (около 10^{-4}), относительная погрешность $\Delta g/g$ в единичном измерении, обусловленная флуктуацией $\Delta\alpha$, примерно равна 10^{-5} . Вклад других слагаемых правой части (2) зависит от типа, используемого в ГБГ лазера и особенностей алгоритма обработки частотных характеристик сигнала биений.

Подбор элементной базы ГБГ

Для изготовления опытного образца ГБГ проведен анализ элементной базы отдельных компонентов конструкции прибора, подобраны оптико-механические элементы с оптимальными характеристиками, удовлетворяющими требованиям получения и регистрации устойчивого частотно-модулированного сигнала биений.

В качестве источника излучения выбран лазерный диод *VCSEL* (*Vertical-cavity surface-emitting laser* – поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором). В отличие от торцевых (*edge-emitter*, *EE*) лазеров FP и DFB, он имеет резонатор, расположенный перпендикулярно плоскости подложки, большую температурную стабильность, потребляет значительно меньшее количество энергии. Требуемым характеристикам соответствует лазерный диод *VCSEL* OP-854.1 производства ФТИ «Оptronикс» [5].

В качестве ключевого оптического элемента ГБГ используется голограмма с дифракционной эффективностью 37 %, изготовленная на основе отбеленных

фотопластинок «Славич» ПФГ 03 Ц. Основные свойства голограммы: угловая селективность дифракции около 10° , угол падения $\alpha = 0$, угол дифракции $\beta = 37,8^\circ$.

Способ мультиплексирования пучков света определяет набор оптических элементов, необходимых для получения картины интерференции при наложении прямого и дифрагированного лучей: а) два зеркала и светоделитель; б) призма ПВО; в) голограмма идентичная подбрасываемой и свободно падающей голограмме.

Подбор оптических элементов схемы ГБГ позволяет перейти к этапу прототипирования и изготовления опытного образца.

Заключение

Основное достоинство ГБГ состоит в простоте конструкции и крайне малой (менее 1 мм) длине траектории падения пробного тела. Это способствует увеличению быстродействия прибора, существенно уменьшает наличие ошибок в измерениях, связанных со стабилизацией положения пробного тела, и создает перспективу появления недорогого компактного гравиметра для применения на подвижных носителях.

Актуальность тематики проводимого исследования подтверждает широкая область применения гравиметров: разведка минералов по аномалиям гравитационного поля Земли, геологическое картирование, вулканология, инженерные работы, региональные исследования гравитации, морские и воздушные измерения. Результаты проекта будут использованы в разработках новой высококачественной аппаратуры для исследования геофизических процессов в ядре и коре Земли, в гравиразведке, при решении задач разведки месторождений нефти и газа, усовершенствовании методик и аппаратуры предупреждения природных катастроф (землетрясений, цунами).

Публикации

1. Дмитриев А.Л., Котова Е.И., Никущенко Е.М., Смирнова А.Л., Прокопенко В.Т. Баллистический гравиметр с падающей голографической дифракционной решеткой // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 117. № 5. С. 110–111.
2. Котова Е.И., Смирнова А.Л. Голограммный баллистический гравиметр // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2015. С. 177–178.
3. Котова Е.И. Влияние угловых погрешностей на работу голограммного баллистического гравиметра [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1335/1335.pdf> (дата обращения: 28.09.16).
4. Котова Е.И. Спектральный анализ сигналов биений на выходе лазерного интерферометра [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/2951/2951.pdf> (дата обращения: 28.09.16).
5. Dmitriev A.L., Kotova E.I. Compact absolute gravimeter based on a dropping holographic diffraction grating // Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016). Saint-Petersburg, 2016. P. 119–121.
6. Дмитриев А.Л., Котова Е.И., Нагибин Ю.Т. Голограммный баллистический гравиметр с фиксацией углового положения пробного тела // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 10. С. 153–154.
7. Заявка на изобретение 2015-157444 Российская Федерация. Голограммный баллистический гравиметр / А.Л. Дмитриев, Е.И. Котова, Е.В. Никущенко. Оpubл. 31.12.2015.

Литература

1. Torge W. Gravimetry. Berlin, 1989. – 482 p.

2. Dmitriev A.L. et al. A ballistic gravimeter with dropping holographic grating // Optics and Spectroscopy. 2014. Vol. 117. No 5. P. 799–800.
3. Dmitriev A.L., Kotova E.I. Compact absolute gravimeter based on a dropping holographic diffraction grating // Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016). Saint-Petersburg, 2016. P. 119–121.
4. Дмитриев А.Л. Голограммный элемент демультимплексора световодной системы связи со спектральным уплотнением каналов // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 7. С. 1352–1357.
5. ИК лазерные диоды [Электронный ресурс] // ФТИ-Оптроник: оптоэлектронные компоненты [Офиц. сайт]. URL: <http://www.fti-optronic.com/ИК-lazernye-diody.html> (дата обращения: 28.09.16).



Краснов Александр Юрьевич
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: krasnov.aleksander@gmail.com

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

А.Ю. Краснов

Научный руководитель – доцент С.А. Чепинский

С появлением беспилотных средств передвижения задача управления движением автономного мобильного робота вдоль заданной пространственной траектории приобрела особенную актуальность, так как такой режим работы является основным для данного класса объектов управления.

Некоторые наиболее распространенные методы заимствованы из задач управления движением ракет и, как правило, включают подход прямой видимости [1]. Эти методы активно совершенствуются и широко используются в морских и воздушных системах навигации.

Другой популярный подход заключается в построении следящей системы, управляемой некоторой эталонной моделью. В рамках этого подхода траектория обычно задана функцией времени, что приводит к практическим сложностям, когда движение объекта отстает или опережает заданное программой время из-за параметрических неопределенностей или внешних возмущений. Для решения этой проблемы траектория должна быть параметризована длиной вместо времени, и динамика этого параметра должна быть включена в модель системы. В этом подходе широко используется понятие виртуального автомобиля, который движется по геометрически заданной траектории. Виртуальный автомобиль связан с движением реального через некоторые абстрактные связи. Этот метод легко реализует движение вдоль полиномиальных кривых, которые обеспечивают лучшее планирование и более точное следование траектории.

Альтернативный подход к траекторному управлению основан на использовании векторных полей [2]. Данный метод обладает глобальной сходимостью. Главный его недостаток заключается в отсутствии общей процедуры построения векторного поля для произвольной кривой.

Подход, используемый в рамках данного проекта, основан на стабилизации инвариантных многообразий в пространстве состояний при помощи линеаризации обратной связью [3] или управления, основанного на пассивности [4]. Проще говоря, для исходной системы выбирается преобразование, генерирующее аттрактор в пространстве состояний. В контексте траекторного управления аттрактором является желаемая траектория, заданная в терминах выходных координат. Тогда остается лишь стабилизировать это решение, что гораздо менее трудоемко, чем построение следящей системы. Автономный мобильный робот, если его рассматривать в качестве объекта управления, описывается как многоканальная нелинейная динамическая система. Задача, которая ставится перед системой управления мобильного робота, заключается в формировании на основании его динамической модели управляющих воздействий, обеспечивающих желаемое перемещение центра масс в рабочем пространстве робота.

Один из методов синтеза подобных алгоритмов управления был представлен И.В. Мирошником. Он основан на втором подходе и предусматривает нелинейное преобразование модели робота к задачно-ориентированной системе координат, что позволяет свести сложную задачу управления многоканальной системой к нескольким простым задачам компенсации линейных и угловых отклонений и затем найти адекватный закон управления с помощью методов нелинейной стабилизации [5–11].

В методике анализа таких систем и синтезе алгоритмов управления, решающих задачу следования заданной траектории как задачу стабилизации по отношению к неявной пространственной кривой, используются методы дифференциальной геометрии нелинейной теории управления (рис. 1).

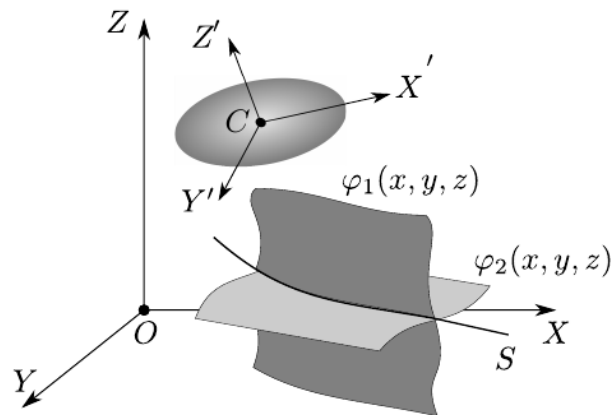


Рис. 1. Задача следования заданной траектории

Одна из наиболее интересных траекторных задач – задача следования подвижной траектории. В данном случае желаемая траектория прикреплена к подвижной системе координат. Это является естественным расширением классических подходов для стационарных систем координат. Примером применения данной задачи служит сопровождение беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) движущегося наземного транспортного средства (рис. 2). В рамках проекта реализуется метод решения подобной задачи с использованием подхода к траекторному управлению, основанного на стабилизации инвариантных многообразий в пространстве состояний. Данное исследование посвящено непосредственно синтезу регуляторов и не затрагивает вопросы планирования траектории.

Общим недостатком большинства изученных работ по данной тематике является то, что авторы ограничиваются лишь теоретическими исследованиями и компьютерным

моделированием. Исходя из этого, большой интерес представляет именно задача экспериментальной проверки полученных теоретических результатов.

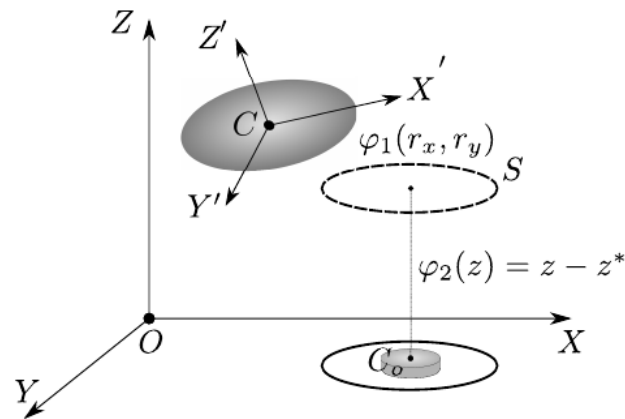


Рис. 2. Задача следования подвижной траектории

Для проведения данного исследования был выбран мобильный робот с роликонесущими колесами *Robotino* от фирмы *Festo Didactics* (рис. 3). Данный тип роботов, с точки зрения механики, является голономной системой и позволяет осуществлять раздельное управление каждой степенью свободы за счет специальной конструкции колес, что существенно облегчает решение задачи управления пространственным положением и позволяет сосредоточиться непосредственно на разработке алгоритмов управления движением центра масс робота.



Рис. 3. Мобильный робот *Robotino*

На основе разрабатываемых теоретических алгоритмов управления реализуется система траекторного управления движением мобильного робота *Robotino*. В рамках рассматриваемых задач стоит обратить особое внимание на двигательную систему (платформа с тремя двигателями постоянного тока со встроенным редуктором и ременной передачей на роликонесущие колеса), позволяющую роботу перемещаться в различных направлениях. При этом следует отметить, что для стабилизации скоростей вращения вала каждого из трех двигателей робота используются встроенные пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы с предустановленными коэффициентами. Робот также оснащен датчиками углов поворота для измерения углов поворота осей двигателей и системой навигации *North Star*, что существенно облегчает проверку разрабатываемых алгоритмов траекторного управления в действии.

Таким образом, результатом выполнения проекта являются нелинейные алгоритмы управления движением, разработанные с применением методов дифференциальной геометрии в рамках подхода, основанного на стабилизации инвариантных многообразий

в пространстве состояний, а также результаты их экспериментальной апробации на платформе мобильного робота с роликонесущими колесами *Robotino* производства фирмы *Festo Didactics*.

Публикации

1. *Kolyubin S.A., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Kapitonov A., Shavetov S.V., Khovanskiy A.V., Krasnov A.Y., Vlasov S.M., Feskov A.D.* Lego mindstorms NXT for students' research projects in control field [Electronic resource] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2012. Vol. 45. No 11. P. 102–106.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015375844> (accessed: 16.04.16).
2. *Borgul' A.S., Margun A.A., Zimenko K.A., Kremlev A.S., Krasnov A.Y.* Intuitive Control for robotic rehabilitation devices by human-machine interface with EMG and EEG signals // 17th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2012. P. 308–311.
3. *Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Surov M.O., Vedyakov A.A., Feskov A.D., Vlasov S.M., Krasnov A.Y., Borisov O.I., Gromov V.S.* Dynamic positioning system for nonlinear MIMO plants and surface robotic vessel [Electronic resource] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2013. Vol. 46. No 9. P. 1867–1872.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016345670> (accessed: 15.04.16).
4. *Власов С.М., Краснов А.Ю., Борисов О.И., Громов В.С., Руденко В.В.* Проектирование и разработка многозвенной робототехнической системы [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/1141/1141.pdf> (дата обращения: 10.04.15).
5. *Wang J., Kapitaniuk I.A., Chepinskiy S.A., Liu D., Krasnov A.J.* Geometric path following control in a moving frame [Electronic resource] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2015. Vol. 48. No 11. P. 150–155.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315012562> (accessed: 27.09.15).
6. *Wang J., Krasnov A.Y., Kapitanyuk Y.A., Chen I., Liu H.* Path following control algorithms implemented in a mobile robot with omni wheels [Electronic resource] // Gyroscopy and Navigation. 2016. Vol. 7. No 4. P. 353–359.
7. URL: <http://link.springer.com/article/10.1134/S2075108716040118> (accessed: 04.11.16).
8. *Wang J., Chepinskiy S.A., Krasnov A.J., Zhang B., Liu H., Chen Y., Khvostov D.A.* Geometric path following control for an omnidirectional mobile robot // 21th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2016. P. 1063–1068.

Литература

1. *Breivik M., Fossen T.* Principles of guidance-based path following in 2d and 3d // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. 2005. P. 627–634.
2. *Lawrence D.A. et al.* Lyapunov vector fields for autonomous unmanned aircraft flight control // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2008. Vol. 31. No 5. P. 1220–1229.
3. *Hladio A. et al.* Path following for a class of mechanical systems // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2013. Vol. 21. No 6. P. 2380–2390.
4. *Fradkov A.L. et al.* Nonlinear and adaptive control of complex systems. Springer, 1999. – 510 p.
5. *Бушуйев А.Б. и др.* Управление траекторным движением многоканальных динамических систем // Известия вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 11. С. 50–56.
6. *Капитанюк Ю.А., Чепинский С.А.* Задача управления многоканальной динамической системой по кусочно-гладкой траектории // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 65–70.
7. *Капитанюк Ю.А., Чепинский С.А.* Control of mobile robot following a piecewise-smooth path // Gyroscopy and Navigation. 2013. Vol. 4. No 4. P. 198–203.

8. *Kapitanyuk Y.A. et al.* Geometric path following control of a rigid body based on the stabilization of sets [Electronic resource] // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2014. Vol. 47. No 3. P. 7342–7347. URL: XXX (accessed: 25.04.16).
9. *Miroshnik I.V., Lyamin A.V.* Nonlinear control of multidrive vehicular robots // Proceedings of IEEE International Conference on Control and Applications. 1994. Vol. 1. P. 79–80.
10. *Miroshnik I.V., Nikiforov V.O.* Trajectory motion control and coordination of multilink robots // 13th IFAC World Congress. 1996. Vol. A. P. 361–366.
11. *Miroshnik I.V., Sergeev K.A.* Robot motion control in dynamic environments // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings. 2001. Vol. 2. P. 1303–1306.



Кривошеев Сергей Владимирович
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра мехатроники
E-mail: krivosheev.sergey89@gmail.com

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМ ПРОТЕЗОМ КИСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ И ИНЕРЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ

С.В. Кривошеев

Научный руководитель – к. т. н. С.С. Резников

Цель проекта – изучить проблематику управления кистевыми протезами руки человека и предложить альтернативный вариант системы управления, который позволял бы управлять как самой кистью, так и лучезапястным суставом. Анализ существующих протезов и работ международных научных групп [1–6] позволяют утверждать, что системы управления в них в большинстве своем не интуитивны и не затрагивают управления лучезапястным и прочими суставами [7]. Доходит до того, что пользователь вынужден здоровой рукой подворачивать кисть на необходимый угол.

Задачами на этот год являлись:

- апробирование нескольких стратегий управления протезом с помощью поверхностной электромиографии;
- разработка системы управления лучезапястным суставом или протезом кисти с помощью инерциальных датчиков;
- объединение полученных результатов и комбинирование двух подходов для создания интуитивной и эффективной системы управления протезом кисти.

Для начала необходимо описать протез, для которого разрабатывается данная система управления. Его можно разделить на две основные части.

Кисть с возможностью отдельного сгибания/разгибания пальцев, а также дополнительной степенью подвижности большого пальца. Большой палец изменяет свое положение за счет работы сервопривода. Введение дополнительной подвижности повышает функциональность протеза, так как в человеческой руке на большой палец ложится до 80 %

функциональности схватов. Отдельное сгибание/разгибание пальцев осуществляется за счет системы тросов, подведенных к каждому пальцу. В теле протеза кисти располагаются двигатели со шкивами, которые осуществляют намотку или размотку тросов.

Лучезапястный сустав состоит из двух вращательных сочленений и двух двигателей, работающих в паре. Это позволяет осуществлять ротацию кисти относительно предплечья, а также сгибание/разгибание сустава, что является принципиальным отличием от многих существующих на рынке протезов.

Трехмерные модели узлов приведены на рис. 1 и 2. Кисть и лучезапястный сустав собраны отдельно. Нам еще предстоит их объединить в одно устройство и провести совместное тестирование, а также решить вопрос прокладки проводов и возможных проблем, связанных с ротацией кисти относительно предплечья.

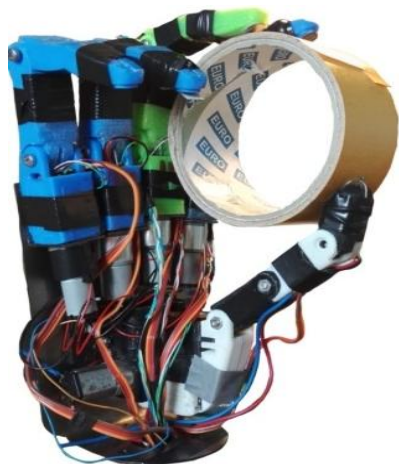


Рис. 1. Собранный прототип кисти руки

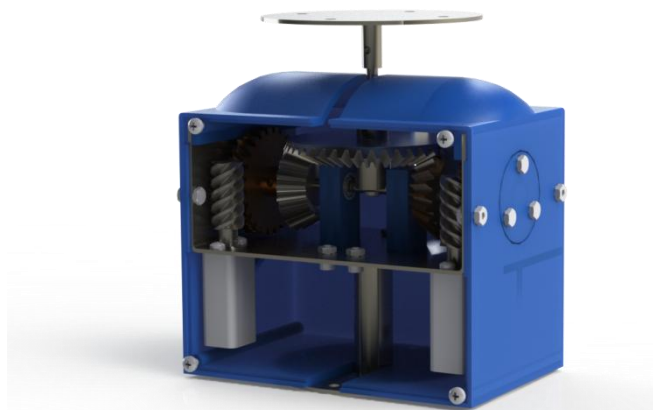


Рис. 2. Модель лучезапястного сустава

Одной из задач работы является формирование набора различных стратегий управления бионическим протезом и дальнейшая их реализация с помощью датчиков электромиографии (ЭМГ), а также их прямое подключение к среде *MatLab* с возможностью дальнейшей обработки и использования данных для управления кистевым протезом.

Для этого были выбраны несколько наиболее критичных параметров, по которым и будет происходить формирование стратегий и дальнейшая их оценка:

- количество используемых электродов;
- зоны снятия сигналов;
- высота ампутации;
- скорость обработки данных;
- интуитивность системы управления.

Остановимся на этих параметрах более подробно. Различные научные группы по всему миру используют разное количество электродов для снятия данных с поверхности руки. В частности, встречаются варианты с двумя, четырьмя, шестью и десятью электродами. В результате происходит увеличение объема обрабатываемых данных, что может напрямую сказываться на скорости их обработки, а следовательно, и на удобстве для пользователя. Возникающая задержка может быть критичной в некоторых ситуациях использования протеза. Кроме этого, различаются и варианты расположения электродов на руке исследуемого объекта в зависимости от их количества и высоты ампутации.

Были выделены следующие стратегии управления по признаку количества электродов: с одним, двумя, тремя и с n -м количеством электродов. Ко всем сигналам, снимаемым с помощью электромиографии, предъявляли определенное требование: им необходимо было преодолеть входное пороговое значение в 1 мВ, чтобы исключить непроизвольный тремор мышц.

Были предложены несколько стратегий управления с помощью одного электрода. Первая из них заключается в простом снятии сигнала, то есть с электрода, расположенного на мышечной группе, поступает сигнал, происходит его программная обработка в среде *MatLab*, и протез кисти совершает простейшее действие – складывается в силовой хват. Причем сила схвата может регулироваться в зависимости от длительности мышечного сокращения, то есть длительностью мышечного сокращения регулируются положения пальцев между начальным и крайним. Для разгибания пациенту необходимо повторить мышечное сокращение. В данном случае не имело значения, на какой мышечной группе размещать электроды, поэтому был выбран глубокий сгибатель пальцев (*лат. flexor digitorum profundus*).

Суть второй стратегии с использованием одного электрода заключается в снятии определенного набора команд (сигналов) для получения которых пациент должен с высокой скоростью сокращать/расслаблять мышечную группу [8]. Была предложена следующая система сигналов: единичное мышечное сокращение, длительное единичное мышечное сокращение, двойное мышечное сокращение с интервалом между иннервацией менее 2 с. Выбор делается минимум из трех предварительно сохраненных схватов, которые человек может применять в зависимости от посылаемых команд. Чтобы кисть пришла в щипковый хват, человек посылает двойное мышечное сокращение с интервалом между пороговыми значениями менее 2 с, а для силового схвата – единичное мышечное сокращение. Приведение протеза в начальное положение осуществляется с помощью повторного командного мышечного сокращения. Для выхода из рабочего режима и возвращения в начальное положение пациенту необходимо повторить мышечное сокращение, также допустим переход между режимами различных схватов при использовании другого запрограммированного мышечного сокращения. В данном эксперименте электроды также были размещены на мышечной группе глубокого сгибателя пальцев.

В случае с двумя электродами тоже было предложено несколько стратегий управления. Общая концепция заключалась в том, что электроды размещали на мышцах-антагонистах, в нашем случае был выбран длинный сгибатель и разгибатель пальцев (*лат. extensor & flexor digitorum*). Первый вариант аналогичен стратегии с одним электродом, когда человек посылал сигнал системе управления протеза и механизм приходил в один из заранее запрограммированных схватов. Различие заключается в том, что для переключения в начальный режим человеку, необходимо было произвести сокращение мышц-антагонистов. Этот вариант похож на реализованный природой, когда в работе кисти используются и мышцы, относящиеся к группе пронаторов, и мышцы, относящиеся к группе супинаторов.

Вторая стратегия в некоторой степени является развитием первой с двумя электродами, но с тем отличием, что она позволяла использовать большее количество разнообразных схватов. Это достигалось применением обоих электродов для переключения между схватами. Человеку для переключения необходимо было всего лишь произвести одновременное сокращение мышц антагонистов, а затем повторить алгоритм, описанный в первой стратегии для двух электродов. В этом варианте использовались те же самые мышечные группы – *extensor & flexor digitorum*.

Третья стратегия с двумя электродами развивает вторую с одним электродом, то есть система должна была распознать, какой именно мышцей пациента было выполнено сокращение – сгибателем или разгибателем. Причем имела дифференциация в алгоритмах управления, был реализован вариант, в котором пронатор и супинатор считывались отдельно, и вариант, в котором антагонисты работали в связке. Данный подход позволил увеличить количество предварительно запрограммированных схватов минимум до шести.

Стратегия управления с тремя электродами приближает нас к тому вопросу, который ранее не затрагивался – управление не всей кистью одновременно, а отдельно каждым из пальцев. В данном случае сделаем некоторые допущения. Разделим работу пальцев кисти на

три группы: I – большой палец, II – средний и указательный пальцы, III – безымянный палец и мизинец. Методом пальпации и с помощью наблюдения за движением руки было определено, что необходимые данные могут быть получены со следующих мышечных групп: плечелучевой мышцы (*лат. musculus brachioradialis*); квадратного пронатора (*лат. musculus pronator quadratus*); глубокого сгибателя пальцев (*лат. musculus flexor digitorum profundus*).

Были проанализированы несколько видов схватов и определено, что данные сигналы можно использовать для управления протезом в простейшем варианте: то есть человек осуществляет мышечные сокращения и группы пальцев сгибаются в соответствии с желанием пациента. Данная стратегия является достаточно простой для реализации, так как необходимо распознавать мышечные сокращения, которые напрямую управляют обозначенными пальцами. Алгоритм построен на анализе сигналов трех каналов электромиографа. В случае превышения порогового значения сигнала система понимает, что необходимо произвести сгибание связанных с каналом пальцев.

Вторая задача носит более сложный характер, так как в этом случае необходимо осуществлять управление лучезапястным суставом. Напомним, что в данном суставе присутствует две степени подвижности – это вращение относительно предплечья и сгибание/разгибание. Необходимость в данном узле появляется, когда у пациента ампутирован в том числе лучезапястный сустав и примерно половина предплечья. В этом случае человек не имеет возможности выполнять ротацию самостоятельно. Для реализации этой задачи нами были выбраны следующие электронные компоненты: *Arduino Uno* – как управляющая плата, а также модуль трехосевого гироскопа и акселерометра GY-521.

Трехосевой акселерометр «чувствует» проекции ускорения на оси *X*, *Y* и *Z*. Если прибор размещен строго горизонтально и не движется, то проекции ускорения силы тяжести на оси *X* и *Y* равны нулю. Сила тяготения воспринимается только чувствительными элементами вертикальной оси *Z*. Время от времени в состоянии покоя производят проверку и калибровку акселерометра. Во время движения объект постоянно то ускоряется, то замедляется. Идеально равномерного движения не существует. Это и позволяет использовать акселерометр не только для определения положения объекта, но и для определения его динамических параметров при движении. Акселерометр регистрирует сумму гравитации и ускорения при движении. Трехосевой гироскоп – датчик поворота объекта – позволяет вычислить углы поворотов по осям *X*, *Y*, *Z* благодаря определению угловых скоростей. Он размещается чуть ниже локтевого сустава и жестко фиксируется в данной точке.

Итак, для того чтобы реализовать ротацию кисти, необходимо отследить крен, создаваемый пользователем. После первичной калибровки его намерения интерпретируются микропроцессором, и сигнал отправляется на двигатель, который отвечает за поворот кисти относительно предплечья. Считается, что в состоянии покоя это 0° по оси *Y*, отклонение вправо соответствует значениям от +1° до +170°, поворот влево значениям от -1° до -170°. На данном этапе не удалось с помощью инерциальных датчиков корректно интерпретировать процесс сгибания/разгибания лучезапястного сустава, поэтому было предложено использовать для этих задач электромиографию.

Таким образом, управление лучезапястным суставом возможно при совместном использовании электромиографии и инерциальных датчиков. Как говорилось выше, это достигается за счет того, что модуль гироскопа и акселерометра измеряет ротацию культи вправо или влево. Процесс сгибания/разгибания выполняется в нем за счет считывания и интерпретации поверхностной ЭМГ с мышц-антагонистов, ответственных за этот процесс у здорового человека. В процессе сгибания лучезапястного сустава участвуют локтевой сгибатель запястья (*лат. musculus flexor carpi ulnaris*) и лучевой сгибатель запястья (*лат. musculus flexor carpi radialis*). К этим мышцам необходимо подвести датчик электронейромиографа и снять соответствующие показания. В зависимости от тонуса мышц можно использовать как одну, так и вторую мышцу. В процессе разгибания участвуют мышцы-антагонисты: локтевой разгибатель запястья (*лат. musculus extensor carpi ulnaris*)

и длинный лучевой разгибатель запястья (*лат.* *musculus extensor carpi radialis longus*). Соответственно для разгибания необходимо подвести датчики к одной из них. В процессе дальнейшей разработки можно будет реализовать процедуру пропорционального сгибания/разгибания за счет амплитуды или длительности сигнала управления.

В процессе работы над алгоритмами обработки и управления был придуман еще один вариант управления, который может оказаться более интуитивным, по сравнению с предложенными ранее. Самое важное, что он позволяет заложить в протез огромное количество разнообразных схватов. Суть алгоритма заключается в том, что пациент выбирает желаемый хват или желаемое положение кисти с помощью жестов в пространстве. Например, человек культей в воздухе «рисует» круг. Данные о перемещениях поступают на гироскоп, оттуда на плату управления и далее на компьютер, где происходит их обработка и распознавание движения «круг». В базе данных закладывается информация, что при движении «круг», кисть необходимо сложить в щипковый хват. Далее для запуска процесса пациент просто сокращает необходимую мышцу, и кисть приходит в желаемое положение. В начальное состояние кисть возвращается через определенный отрезок времени или при поступлении сигнала с мышцы-антагониста. Этот алгоритм является концепцией, его разработка и оценка – дальнейшие цели исследования.

Заключение

В процессе выполнения проекта:

- разработан кистевой протез с модулем лучезапястного сустава;
- подобраны электронные компоненты, необходимые для его реализации;
- написаны алгоритмы управления и обработки сигналов;
- получено несколько различных стратегий управления кистевым протезом с различным набором параметров и характеристик;
- выполнена оценка их эффективности;
- разработаны алгоритмы управления на основе комбинации инерциальных датчиков и поверхностной электромиографии для лучезапястного модуля, который устанавливается при более высокой ампутации предплечья;
- предложена альтернативная версия управления протезом, что является заделом для дальнейшей работы в этом направлении.

Сферы применения разработки:

- в современных протезах при различной высоте ампутации предплечья;
- управление различными устройствами в быту с помощью жестов и электромиографии (для этого необходимо придать всей разработке более компактную и удобную в повседневной жизни форму);
- управление различными экзоскелетными или реабилитационными комплексами.

Публикации

1. *Кривошеев С.В.* Различные стратегии управления бионическим кистевым протезом с учетом определённых параметров // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 3. С. 29–33.
2. *Борисов И.И., Кривошеев С.В., Резников С.С., Олейник Р.В.* Разработка электромеханического протеза кисти с обратной связью // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов. Казань, 2015. С. 541–543.
3. *Borisov I.I., Krivosheev S.V., Oleinik R.V., Reznikov S.S.* Development of design, control system and feedback system of electromechanical hand // Doctoral School of Energy and Geotechnology II. Parnu, 2015. P. 181–182.

4. *Кривошеев С.В., Орманов Д.Р.* Управление моделью многозвенного манипулятора с помощью значения электрических токов, снятых с поверхности руки // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 2. С. 41–44.

Литература

1. *Balbinot A. et al.* Decoding arm movements by myoelectric signal and artificial neural networks // Intelligent Control and Automation. 2013. Vol. 4. No 1. P. 87–93.
2. *Wojtczak P. et al.* Hand movement recognition based on biosignal analysis // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2009. Vol. 22. No 4–5. P. 608–615.
3. *Shroffe E.H., Manimegalai D.P.* Hand gesture recognition based on EMG signals using ANN // International Journal of Computer Application. 2013. Vol. 2. No 3. P. 31–39.
4. *Lucas L. et al.* An EMG-controlled hand exoskeleton for natural pinching // Journal of Robotics and Mechatronics. 2004. Vol. 16. No 5. P. 482–488.
5. *Jiang N. et al.* EMG-based simultaneous and proportional estimation of wrist/hand kinematics in uni-lateral trans-radial amputees [Electronic resource] // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2012. Vol. 9. No 42. URL: <http://www.jneuroengrehab.com/content/9/42> (accessed: 02.05.16).
6. *Maier S., van der Smagt P.* Surface EMG suffices to classify the motion of each finger independently // Proceedings of the 9th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC). München, 2008. P. 59–68.
7. *Biddiss E., Chau T.* Upper limb prosthesis use and abandonment: a survey of the last 25 year // Prosthetics and Orthotics International. 2007. Vol. 31. No 3. P. 236–257.
8. *Кривошеев С.В., Орманов Д.Р.* Управление моделью многозвенного манипулятора с помощью значения электрических токов, снятых с поверхности руки // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 2. С. 41–44.



Кузнецова Ольга Валерьевна
Факультет информационной безопасности и компьютерных технологий
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: ovkpbks@yandex.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Кузнецова

Научный руководитель – доцент Е.Б. Романова

На сегодняшний день большинство САПР, поддерживающих возможность 3D-моделирования, предназначены для использования в области машиностроения, а область электроники нуждается в их использовании для печатных плат (ПП). Современные САПР ПП обладают недостаточными инструментальными средствами для получения детализированных 3D-моделей печатных узлов (ПУ) в единой программной среде.

Трудности применения машиностроительных САПР (МСАПР) для 3D-моделирования ПУ связаны с проблемами передачи информации из САПР ПП.

Современная тенденция информационного обмена в рамках единого информационного пространства (ЕИП) обеспечивается *CALS* подходом. Работа в ЕИП позволяет осуществлять непрерывную информационную поддержку изделия. Анализ различных САПР, используемых при проектировании ПУ в ЕИП, позволяет сделать вывод о том, что существуют возможности сокращения сроков проектирования и повышения качества разрабатываемых ПУ посредством использования современных методов компьютерного геометрического моделирования.

Для уменьшения количества ошибок и исключения потери и искажения информации при конвертации данных из САПР ПП в МСАПР, а также для повышения эффективности сквозного проектирования ПУ в ЕИП и использования информации, полученной в результате обмена, необходимо повысить интероперабельность САПР электронных устройств (ЭУ). Кроме того, отсутствуют концептуальные методики, описывающие применение существующих подходов для синтеза и анализа проектных решений ПУ в САПР, позволяющие на их основе получить детализированное представление 3D-модели ПУ в приемлемые сроки.

Цель данного проекта – повышение эффективности проектирования ПУ с помощью разработки алгоритмического обеспечения автоматизированного проектирования ПУ на основе 3D-моделирования, способствующего сокращению сроков проектирования и повышению качества разрабатываемых ЭУ.

Для достижения поставленной цели в ходе выполнения проекта были решены следующие задачи:

- проведен анализ современных подходов для синтеза и анализа проектных решений ПУ в 3D-пространстве САПР ПП и МСАПР;
- разработаны способы расширения функциональных возможностей САПР, используемых при проектировании ПУ в 3D-пространстве;
- разработаны средства унификации прикладных протоколов информационной поддержки автоматизированного проектирования ПУ в 3D-пространстве;
- разработан комплекс алгоритмов автоматизированного проектирования ПУ на основе 3D-моделирования;
- предложена методика автоматизированного проектирования ПУ на основе 3D-моделирования в ЕИП САПР ЭУ.

Разработка алгоритмического обеспечения и средств унификации прикладных протоколов информационной поддержки автоматизированного проектирования ПУ в 3D-пространстве основана на использовании методологии автоматизированного проектирования, методов компьютерного геометрического моделирования, методов объектно-ориентированного программирования, теории *CALS*-технологий; методологии функционального моделирования *IDEF0*.

Основной трудностью при проектировании ПУ в 3D-пространстве является процесс взаимодействия САПР ПП и МСАПР: данные, доступные из САПР, отличаются неоднородностью и формой представления. Так при передаче их из одной САПР в другую происходит потеря и искажение информации, что препятствует качественному проектированию ПУ [1]. Данная проблема существует повсеместно, чтобы ее избежать, необходимо либо разрабатывать ПУ в 3D-пространстве интегрированной САПР ПП либо повысить свойства интероперабельности САПР ЭУ.

Расширение функциональных возможностей САПР ПП возможно посредством расширения языка спецификаций данной группы САПР за счет добавления операторов, необходимых для 3D-моделирования объектов в единой программной среде с помощью применения унифицированного языка описания проектных решений *EXPRESS* [1].

Расширить функциональные возможности САПР ПП предлагается посредством добавления в САПР ПП следующих инструментов:

- построения базовых элементов формы (БЭФ), таких как параллелепипед, конус, пирамида. БЭФ – геометрические модели трехмерных тел, входящие как элементарная часть во многие геометрические модели более сложных конструкций;
- формирования 3D-моделей с помощью метода конструктивной геометрии (*Constructive Solid Geometry*), метода твердотельного моделирования деталей и сборок в САПР на основе БЭФ (выполнение теоретико-множественных операций (сложения, вычитания и пересечения) над БЭФ);
- формирования 3D-моделей из двумерных эскизов посредством метода вращения (частный случай кинематического метода (поверхность детали образуется в результате перемещения двумерного контура по заданной траектории), например для формирования 3D-моделей микросхем, для формовки выводов);
- редактирования (отсечения, вырезания, формирования скруглений и фасок);
- оформления чертежей в соответствии с ГОСТ 2.417-91 и ЕСКД, в том числе таблиц, размеров, шероховатостей, штриховок;
- формирования встроенных библиотек: установочных изделий, корпусов электронных компонентов (ЭК), отверстий, реперных знаков.

Говоря об интероперабельности САПР, в контексте проблемы проектирования ПУ в 3D-пространстве, имеется в виду совместимость на уровне прикладных протоколов и форматов данных [2]. Для повышения свойств интероперабельности САПР ПП и МСАПР предлагается согласовать описание передаваемой информации из одной САПР в другую посредством специального приложения, называемого модулем преобразований (МПр). Основная его функция – предоставление системе исполняемого кода обработки данных в объеме, необходимом для проектирования детализированной 3D-модели ПУ посредством унификации прикладных протоколов информационной поддержки. МПр является связующим звеном в процессе обмена данными между САПР ПП и МСАПР. Он преобразует переданную информацию, используя два наиболее распространенных формата *STEP* и *IDF*. В МПр передаваемый файл проходит проверку. Разработанный модуль позволяет осуществить преобразование данных для более полной передачи информации о ПУ с учетом объема текстовой, числовой и графической информации для дальнейшего проектирования ПУ в 3D-пространстве.

После сравнения передаваемой модели (ПМ) с эталонной (модель, сформированная в МПр на универсальном языке *EXPRESS*) осуществляется преобразование данных. При различии кодов этих моделей выделяются неправильные участки кода в передаваемом файле. Далее в ПМ выделяются объекты, которые неверно описаны или которых не хватает в ПМ, и формируется дополнительное описание объектов и их значений, затем выполняется доработка передаваемой модели. В результате ПМ обновляется и снова осуществляется итерация (сравнение ПМ с эталонной моделью), и так до тех пор, пока объем информации в ПМ не достигнет нужного.

Эталонная модель (данные для 3D-моделирования ПУ) включает следующую информацию:

- текстовую: единицы измерения, металлизация отверстий, системы координат, сетка, стили таблиц; с указанием слоя: наименование типа ЭК, стиль текстов атрибутов, позиционные обозначения, наименование посадочного топологического места (ПТМ) корпуса, назначение отверстий (переходное, контактная площадка для штыревого компонента), содержание автополей, высота корпуса;
- числовую: номера и координаты центров контактных площадок, координаты точек привязок атрибутов, установки технологических параметров (высоты над платой, зазора между компонентами);

- графическую (с указанием слоя): корпус ЭК, установочные изделия, крепежные детали, конструктивы плат, запретные зоны, проводники, полигоны, вырезы в полигонах;
- массивы (с указанием слоя): заливка.

Для изображения спецификаций данных, определенных в языке *EXPRESS*, используется графическая нотация *EXPRESS-G* по ГОСТ Р ИСО 10303-46. Данные о представлении в соответствии со стандартом связывают с данными об объекте и обмениваются ими между системами, что дает возможность создавать ряд изображений информации об объекте, пригодных для восприятия. В качестве эталонной принята модель, представленная на рис. 1. Объекты модели описаны на языке *EXPRESS* (для наглядности разработана *EXPRESS*-диаграмма), а описание конкретных значений атрибутов – в нотации Вирта [3]. Преобразование данных, передаваемых в форматах *STEP* и *IDF*, осуществляется с помощью разработанных алгоритмов.

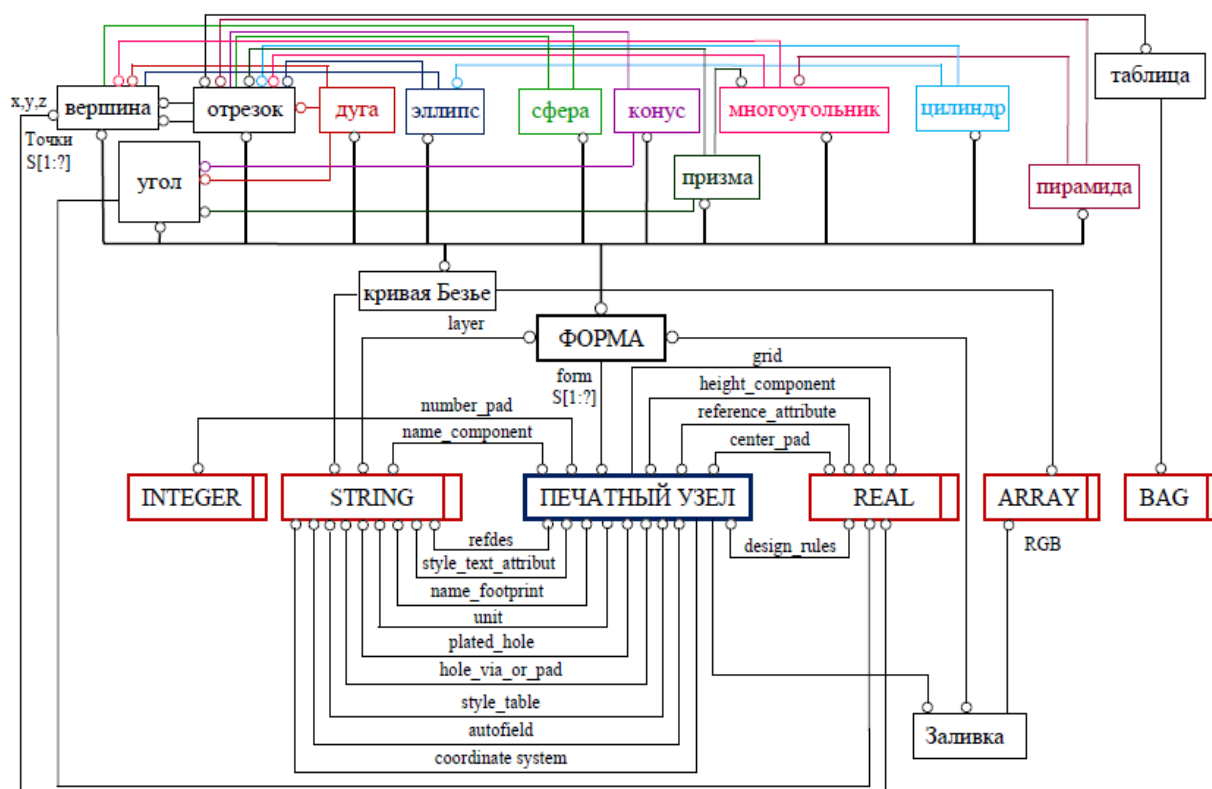


Рис. 1. Эталонная модель 3D-модели ПУ в графической нотации *EXPRESS-G*

Одними из важных этапов, выполняемых при проектировании 3D-модели ПУ в 3D-пространстве САПР ПП, являются этапы формирования 3D-модели корпуса ЭК и конструктива платы. На основе используемых в САПР ПП методов компьютерного геометрического моделирования и предложенных способов расширения функциональных возможностей предложены алгоритмы разработки 3D-моделей ЭК в интегрированной САПР ПП и конструктива платы инструментальными средствами САПР ПП. Посредством предложенных оригинальных алгоритмов можно разрабатывать 3D-модели ЭК и конструктивов плат в единой программной среде САПР ПП. Предложенный алгоритм формирования 3D-модели ЭК позволит существенно сократить время на разработку библиотеки ЭК. Алгоритм разработки 3D-модели конструктива ПП описывает инструментальные возможности САПР ПП и позволяет выбрать наилучший способ для формирования 3D-модели конструктива платы. Предложенные способы расширения функциональных возможностей САПР ПП можно также использовать для разработки 3D-моделей установочных изделий и крепежных деталей.

Одним из наиболее важных этапов проектирования ПУ в МСАПР является этап импорта данных из САПР ПП в МСАПР. В ходе выполнения проекта были разработаны алгоритмы:

- импорта данных из САПР ПП в МСАПР, выполняемые посредством различных форматов обмена данными;
- формирования 3D-моделей ЭК в МСАПР;
- формирования 3D-модели ПУ в МСАПР, описывающей процесс разработки габаритной и детализированной 3D-модели ПУ.

Все они предназначены для синтеза и анализа проектных решений 3D-моделирования ПУ в МСАПР и основаны на использовании предложенных способов повышения эффективности проектирования ПУ и принципов повышения свойств интероперабельности. Разработанные алгоритмы позволяют: избежать всевозможных ошибок, возникающих в процессе конвертации данных и сократить сроки выполнения отдельных этапов проектирования.

Автоматизированное проектирование ПУ на основе 3D-моделирования предполагает определенную последовательность типовых проектных процедур, количество и последовательность которых определяются как спецификой разрабатываемого ПУ, так и методологией проектирования, основанной на принципах проектирования ПУ с применением САПР. В ходе исследования была создана методика автоматизированного проектирования ПУ на основе 3D-моделирования в ЕИП САПР ЭУ, описывающая систематизированную совокупность действий, которую необходимо осуществить для разработки детализированной 3D-модели ПУ (рис. 2).

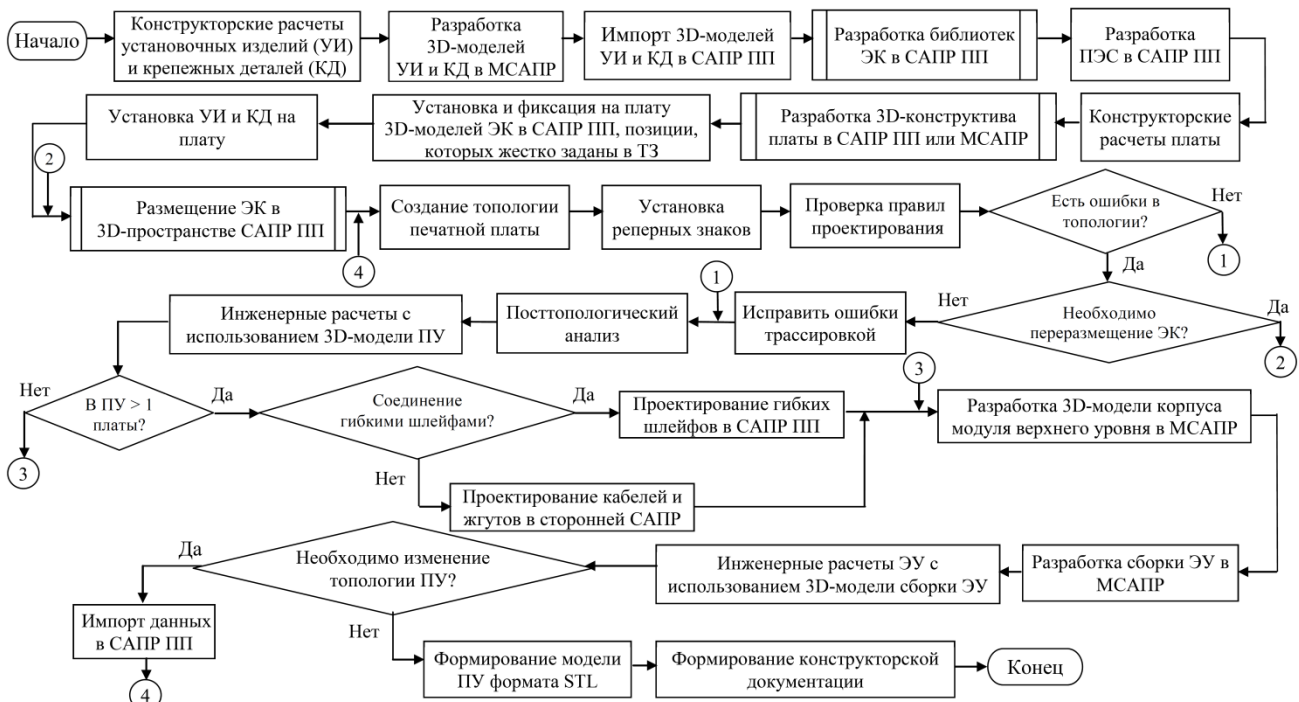


Рис. 2. Методика автоматизированного проектирования ПУ в ЕИП САПР ЭУ на основе 3D-моделирования

Заключение

Разработанное алгоритмическое обеспечение может быть использовано для проектирования ПУ в 3D-пространстве современных САПР ПП (*Altium Designer, CADSTAR*) и МСАПР (*SolidWorks, КОМПАС-3D, T-FLEX CAD, Inventor*). Его применение позволит повысить качество проектирования разрабатываемых ПУ, сократить сроки их проектирования и, как следствие, электронных устройств в целом, увеличить эффективность деятельности разработчиков.

Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы для проектирования ПУ в ЕИП САПР ЭУ, при формировании прототипов деталей и конструкций электронных устройств, а также для оптимизации и повышения свойств интероперабельности САПР. Разработанное алгоритмическое обеспечение может применяться для формирования 3D-моделей ПУ, которые используют для 3D-компоновки изделия в *MCAD* и для 3D-моделирования кабелей и жгутов в электротехнических САПР.

Разработанная методика автоматизированного проектирования ПУ в ЕИП, а также реализующие ее модели и алгоритмы для синтеза и анализа проектных решений ПУ позволяют на 25 % повысить точность построения 3D-моделей и сократить сроки конструкторского этапа проектирования.

Результаты эксплуатации разработанных методик доказали правильность теоретических моделей и алгоритмов, представленных в работе, их рентабельность, которая обеспечивает повышение технико-экономического уровня разрабатываемых устройств, снижение трудоемкости и увеличение эффективности работы разработчиков. Предложенное алгоритмическое обеспечение может быть использовано для дальнейших исследований в области автоматизированного проектирования конструктивно сложных машиностроительных и приборостроительных изделий с развитой электронной базой.

Публикации

1. *Кузнецова О.В.* Модели и алгоритмы автоматизированного проектирования печатных узлов в трехмерном пространстве интегрированных систем автоматизированного проектирования печатных плат // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2016. С. 55–58.
2. *Кузнецова О.В.* Повышение свойств интероперабельности САПР используемых при проектировании печатных узлов в трехмерном пространстве // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. СПб., 2016. С. 94–95.
3. *Кузнецова О.В.* Методы повышения эффективности проектирования объемных печатных узлов в различных системах автоматизированного проектирования // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 2. СПб., 2015. С. 78–81.

Литература

1. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. М., 2006. – 448 с.
2. *Долгих Э.А. и др.* Основы применения CALS-технологий в электронном приборостроении: учебное пособие. Красноярск, 2008. – 130 с.
3. *Батоврин В.К. и др.* Открытые системы. Интероперабельность // Информационные технологии и вычислительные системы. 2009. № 5. С. 7–15.



Кутузов Илья Михайлович
Факультет информационной безопасности и компьютерных технологий
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: formalizator@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБФУСКАЦИИ ИСХОДНЫХ КОДОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

И.М. Кутузов

Научный руководитель – профессор А.Г. Коробейников

Исследование посвящено решению проблемы защиты программных продуктов от несанкционированного использования, распространения и модификации с помощью методов обфускации. Цель данной работы – повышение защищенности информации, а также увеличение структурированности методов и алгоритмов защиты информации на базе обфускации. Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ существующих методов, алгоритмов, моделей, методик и средств обфускации для выявления их преимуществ и недостатков;
- выполнить параметризацию существующих методов обфускации и их результатов, позволяющую производить дальнейшую оценку защищенности программного продукта (ПП);
- разработать методики обфускации программных продуктов для языка программирования *Java* с использованием произвольного количества параметризованных методов обфускации;
- провести апробацию результатов экспериментальных исследований, позволяющих оценить защищенности ПП на языке программирования *Java*.

Научная новизна заключается в разработке алгоритма и методики обфускации программного кода для языка программирования *Java*. Разработанная методика позволяет использовать произвольное количество параметризованных методов обфускации с целью выявления оптимальной последовательности их применения.

Применение разработанной методики позволит сократить использование неэффективных методов обфускации на конкретных экземплярах приложений, максимизировать минимальные необходимые усилия для деобфускации ПП. Таким образом, сокращаются как временные, так и человеческие ресурсы, необходимые для проведения защиты приложения данным методом. Полученные результаты успешно использованы на предприятиях, где существует необходимость защиты ПП от несанкционированного доступа (НСД) или несанкционированных модификаций.

Среди наиболее значимых вкладов в развитие обфускации можно выделить работы Колберга, Варнавского, Курмангалиева, Мадоу, Делла Педра и других. Ведущими стандартами в сфере оценки ее эффективности на текущий момент являются государственные стандарты качества программного обеспечения и конвенции программирования для конкретных языков (CSC) [1–3].

Большинство аналитических экспертных методов основываются на трех величинах, характеризующих степень эффективности процесса обфускации: устойчивости, эластичности и стоимости преобразования. Предполагается, что человек может деобфусцировать любой обфусцированный код, поэтому оценка эластичности производится на автоматизированных деобфускаторах. Описанные критерии нацелены на экспертную оценку самого метода обфускации и его эффективности на конкретном исходном коде.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

Оценка методов на основе циклической сложности и ветвления потока управления рассматривает критерии эффективности методов обфускации, основанные на метриках сложности графа потока управления программ. Метрикой называется отображение, ставящее в соответствие каждой программе некоторое число.

Используемые метрики:

– LC – метрика размера процедуры, простейшая метрика сложности кода. Чем больше процедура, тем выше априорная оценка ее сложности. Размер каждой процедуры будет измерен в инструкциях промежуточного представления;

– YC – метрика сложности циклической структуры определяется как мощность транзитивного замыкания отношения достижимости в графе потока управления процедуры;

– DC – метрика сложности потока данных процедуры. Она позволяет оценить сложность зависимостей по данным в процедуре и вычисляется как количество дуг в графе, достигающих определений процедуры;

– MC – метрика усложнения программы при запутывании вычисляется по формуле:

$$MC = \frac{Y C(\text{после защиты})}{Y C(\text{до защиты})} + \frac{D C(\text{после защиты})}{D C(\text{до защиты})} . \quad (1)$$

Наилучшими параметрами обладают преобразования повышения косвенности, вставки непрозрачных предикатов и введения диспетчера. Очевидно, что устойчивость к анализу возрастает при применении нескольких запутывающих преобразований. Но также можно повысить сложность самих преобразований путем связывания потоков данных, вводимых ими с потоками данных исходной программы, и устранения слабых мест преобразований. Этот подход также оценивает метод обфускации, основываясь на вносимых модификациях в поток управления ПП. Из основного уравнения данного метода видно, что сравнивается состояние до обфускации и после.

Построение модели комплексной защиты приложения на базе обфускации

В качестве математической модели приложения предполагается абстракция от конкретной парадигмы программирования и введение условного синтаксического анализатора, который разобьет приложение P на различные блоки кода cb . Эти блоки могут иметь произвольную степень абстракции данных, которая не регламентирует их связность. Каждый блок кода состоит из полей метаданных bm , характеризующих свойства и состояние блока кода bd . Также блок кода содержит данные $data$ для связи с другими cb и/или для хранения фрагмента исходного кода. При этом блоки кода должны выбираться таким образом, чтобы все они являлись частями программы, которая может быть восстановлена из суммы этих блоков:

$$\begin{cases} P = \sum_{i=0}^n dm_i + db_i, \\ cb_i = dm_i + db_i, \\ dm = \sum_{j=0}^n dm_j. \end{cases} \quad (2)$$

Блоки кода выделяются таким образом, чтобы имелась возможность внести изменения в отдельный блок с сохранением его функционала вне зависимости от других блоков. Подобное разбиение позволяет производить оценку эффективности отдельных методов обфускации t на различных cb . Метод обфускации отвечает за корректную проекцию изменений данных на изменения параметров метаданных. Таким образом, любое изменение в данных блока кода соответствует пропорциональному изменению метаданных:

$$\begin{cases} m(cb) = cb', \\ db' \sim dm'. \end{cases} \quad (3)$$

Подобная зависимость гарантирует, что большие изменения должны сильно повлиять на метаданные. С помощью данного подхода открывается возможность анализа чувствительности блока кода к конкретному методу обфускации.

Анализ чувствительности является важной математической моделью в рамках данного исследования, так как на его базе строится выбор оптимального метода защиты информации на основе обфускации. Анализ чувствительности переводит оценку эффективности обфускации в часть процесса обфускации. Данная модель (2) позволяет провести анализ исходных кодов приложения до и после обфускации для вычисления эффективности использования на конкретном исходном коде. В ее рамках можно реализовать подход, используемый в ГОСТ, применяя в качестве параметров метаданных анализируемость, изменяемость, стабильность и тестируемость. Таким образом, данная модель является обобщением подхода ГОСТ. Помимо этого, можно реализовать метод оценки эффективности обфускации на основе циклической сложности и ветвления потока управления, если в качестве метрик использовать метрику сложности циклической структуры и оценку сложности потока данных процедуры. Так можно описать две наиболее передовые методики в области оценки эффективности метода обфускации.

Для построения модели обфускации приложения обфускатор должен задать вектор весов полей метаданных и пороговые значения для них. Также требуется задать суммарное пороговое значение:

$$C = \begin{cases} w = (w_1, w_2, \dots, w_j), \\ \delta_{min} = (\delta_{min_1}, \delta_{min_2}, \dots, \delta_{min_j}), \\ \Sigma_{min}. \end{cases} \quad (4)$$

Настройки C будут использоваться для выявления методов, приносящих максимальную пользу для защиты информации. Поскольку анализ исходного кода на предмет вносимых изменений сопоставим по времензатратным и вычислительным ресурсам с непосредственным внесением этих изменений, анализ чувствительности является одной из самых эффективных математических основ для проведения обфускации данного уровня. Любое исключительное условие, приводящее к невозможности дальнейшей обфускации, является достаточным для того, чтобы считать данный метод неприменимым к конкретному блоку кода, результат воздействия которого считается негативным.

Для выявления наиболее эффективного метода обфускации на каждом из этапов для каждого из блоков кода требуется составить список методов, изменения которых превосходят минимальные изменения из настроек с последующим ранжированием по суммарному взвешенному влиянию каждого из них:

$$m = \max_{i=0} \sum_{j=0} \delta m_i [j]. \quad (5)$$

С помощью выражения (5) выбирается наиболее эффективный метод обфускации, и операция повторяется. В качестве ограничений количества повторов могут служить счетчик количества итераций, счетчик времени, затрачиваемого на процесс обфускации, и постепенное ухудшение степени изменений каждым из методов в отдельности после каждого применения. Поскольку приложение состоит из отдельных блоков кода, можно выделить те из них, которые не связаны друг с другом, и проводить обфускацию этих блоков параллельно. Такой подход позволяет сокращать время, затрачиваемое на обфускацию ПП. Это может дать преимущество при использовании автоматических обфускаторов в многопроцессорной среде [4–5].

Проверка эффективности разработанных методов и алгоритмов

Проверка эффективности разработанных методов и алгоритмов на применимость к реальному приложению проводится путем их апробации на этом приложении и сравнении с существующими аналогами такого же класса. Сначала, до применения методов

обфускации, приложение оценивается на основе ГОСТ, что необходимо для определения его эффективности в дальнейшем (Таблица).

Таблица

Оценка защищенности приложения

Параметр	Значения исходной защищенности приложения с помощью ГОСТ, отн. ед.	Защищенность приложения после переименования методов, отн. ед.	Защищенность приложения после внедрения диспетчера, отн. ед.	Защищенность приложения после применения разработанного алгоритма, отн. ед.
Анализируемость	1	1,35	1,96	3,13
Изменяемость	1	1,03	1,52	3,7
Стабильность	1	1	2,13	2,63
Тестируемость	1	1,08	1,14	3,23

Как видно из таблицы, исходная защищенность приложения равна единице по каждому из параметров. Применение разработанного алгоритма обфускации оказывается достаточно эффективным, что подтверждается увеличением значений контролируемых параметров. Для достижения максимального эффекта алгоритм может использовать комбинации различных методов обфускации.

Одной из простых операций обфускации по порогу вхождения специалиста информационной безопасности является переименование методов, что подтверждается эффективными результатами на практике. Поскольку оценка производилась экспертами в информационной безопасности, эта операция получила такие заниженные оценки.

Самой эффективной операцией запутывающих преобразований на текущий момент следует считать внедрение диспетчера. При этом резко падают анализируемость приложения и его стабильность, что связано с различием сигнатур методов.

Применение разработанного алгоритма обфускации, как видно из таблицы, оказывается эффективным по каждому из выделенных параметров не только по отношению к незащищенному приложению, но и к другим методам обфускации.

Заключение

Предложенный в работе метод позволяет надежно защитить приложение от посторонних модификаций и анализа, что подтверждает эффективность разработанного алгоритма. Поскольку для каждого блока кода подбирается наиболее эффективный список методов обфускации, усложняется вычисление базового алгоритма обфускации и последующего применения деобфускатора.

Поставленные в рамках исследования цели достигнуты. Разработанная методика позволяет гарантированно увеличить степень защищенности приложения и снизить вероятность вмешательства или его несанкционированной модификации.

Публикации

1. Кутузов И.М., Коробейников А.Г., Блинов С.Ю., Лейман А.В., Маркина Г.Л. Алгоритм определения спамности документов на основе фейеровских отображений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 12. № 6. С. 123–127.
2. Кутузов И.М., Коробейников А.Г., Кувшинов С.С., Блинов С.Ю., Лейман А.В. Цифровые водяные знаки в графических файлах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 1. С. 152–157.

3. Кутузов И.М., Коробейников А.Г. Использование Asmifier для защиты ПО // Материалы конференции ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». СПб., 2016. С. 39–47.
4. Кутузов И.М., Коробейников А.Г. Цифровые водяные знаки в программных продуктах с использованием обфускации // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'16. Научное издание в 3-х томах. Т. 2. М., 2016. С. 15–19.
5. Кутузов И.М., Коробейников А.Г. Обфускация сокрытия вызовов при помощи инструкции invokedynamic [Электронный ресурс] // Кибернетика и программирование. 2016. № 5. С. 33–37. URL: http://e-notabene.ru/kp/article_18686.html (дата обращения: 15.12.16).

Литература

1. Collberg C., Nagra J. Surreptitious software: obfuscation, watermarking, and tamperproofing for program protection. Addison-Wesley Professional, 2009. – 792 p.
2. Batchelder M., Hendren L. Obfuscating Java: The most pain for the least gain // Proceedings of the Compiler Construction. Braga, 2007. С. 96–110.
3. Bitansky N., Canetti R. On strong simulation and composable point obfuscation // Advances in Cryptology – CRYPTO. 2010. Vol. 6223. P. 520–537.
4. Коробейников А.Г., Кутузов И.М. Алгоритм обфускации // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 1–8.
5. Коробейников А.Г. и др. Цифровые водяные знаки в графических файлах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 1. С. 153–157.



Кучер Дмитрий Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: dmitry.a.kucher@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ

Д.А. Кучер

Научный руководитель – старший научный сотрудник С.А. Чивилихин

Введение

Одним из используемых методов для получения неорганических наночастиц является гидротермальный синтез [1–3]. Эффективность этого процесса определяется пространственно-временными характеристиками поля температур в автоклаве. Исследуя параметры, определяющие этот процесс, можно найти условия, при которых он происходит наиболее эффективно. В качестве таких параметров выступают поля температур, концентраций и скоростей.

Для получения данных о процессе гидротермального синтеза необходимо построить математическую модель физических процессов, которые происходят в автоклаве во время

опыта. Одним из них является конвективный теплообмен. Изменение температуры при этом происходит за счет нагрева стенок автоклава. Наличие нагревателя вызывает конвективное движение жидкости, возникающие при этом конвективные потоки приводят в движение частицы, находящиеся в растворе. Далее они перераспределяются в объеме автоклава. Места, где концентрация частиц превышает критическую для данного вещества, являются областями наиболее вероятного возникновения наночастиц. Для организации наиболее эффективного процесса синтеза наночастиц необходимо подобрать условия, при которых объем областей с концентрацией, превышающей критическую, будет максимален.

Моделирование задачи конвективного движения

Математическое описание задачи в приближении Буссинеска выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} &= 0, \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_c), \\ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right),\end{aligned}$$

где u , v – компоненты скорости, p – давление, η – динамическая вязкость, T – температура, ρ – плотность, α – коэффициент температуропроводности, β – коэффициент температурного расширения, T_c – равновесная температура, g – ускорение свободного падения [4].

Для верификации решателя, построенного с использованием *OpenFOAM* можно рассмотреть случай, входящий в «классическую коллекцию» Европейского научного сообщества потоков, турбулентности и горения (*ERCOfTAC – European Research Community On Flow, Turbulence And Combustion*) [5].

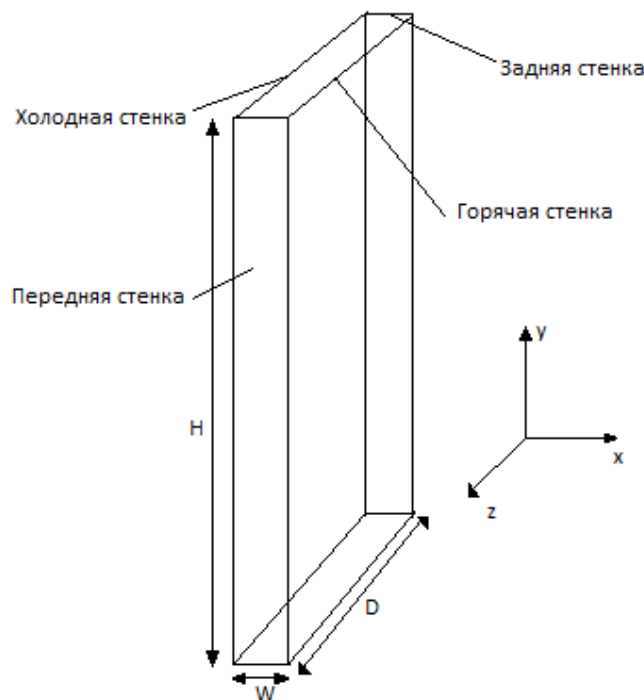


Рис. 1. Схематическое представление постановки задачи:
 H – высота сосуда, D – длина, W – ширина

Для описания этого случая граничные условия имеют следующий вид (рис. 1):

$$u(x, 0, z) = u(x, H, z) = 0,$$

$$u(0, y, z) = u(W, y, z) = 0,$$

$$u(x, y, 0) = u(x, y, D) = 0,$$

$$v(x, 0, z) = v(x, H, z) = 0,$$

$$v(0, y, z) = v(W, y, z) = 0,$$

$$v(x, y, 0) = v(x, y, D) = 0,$$

$$T(0, y, z) = T_c,$$

$$T(W, y, z) = T_h,$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}(x, 0, z) = \frac{\partial T}{\partial y}(x, H, z) = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0) = \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, D) = 0,$$

где T_h – температура горячей стенки сосуда, T_c – холодной.

Для решения задачи конвективного теплопереноса удобно использовать стандартный решатель из *OpenFOAM buoyantPimpleFoam* [6, 7]. Это нестационарный решатель для задачи теплопереноса при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости или газа. В его основе лежит алгоритм *PIMPLE*, который является комбинацией алгоритмов *SIMPLE* и *PISO*.

Моделирование тестовой задачи проводилось с теми же параметрами, которые использовались для получения экспериментальных данных в *ERCOFTAC* [5]:

$$Pr = 0,71; T_c = 19,6^\circ\text{C}; T_h = 39,9^\circ\text{C}.$$

Результаты моделирования приведены на рис. 2 и 3.

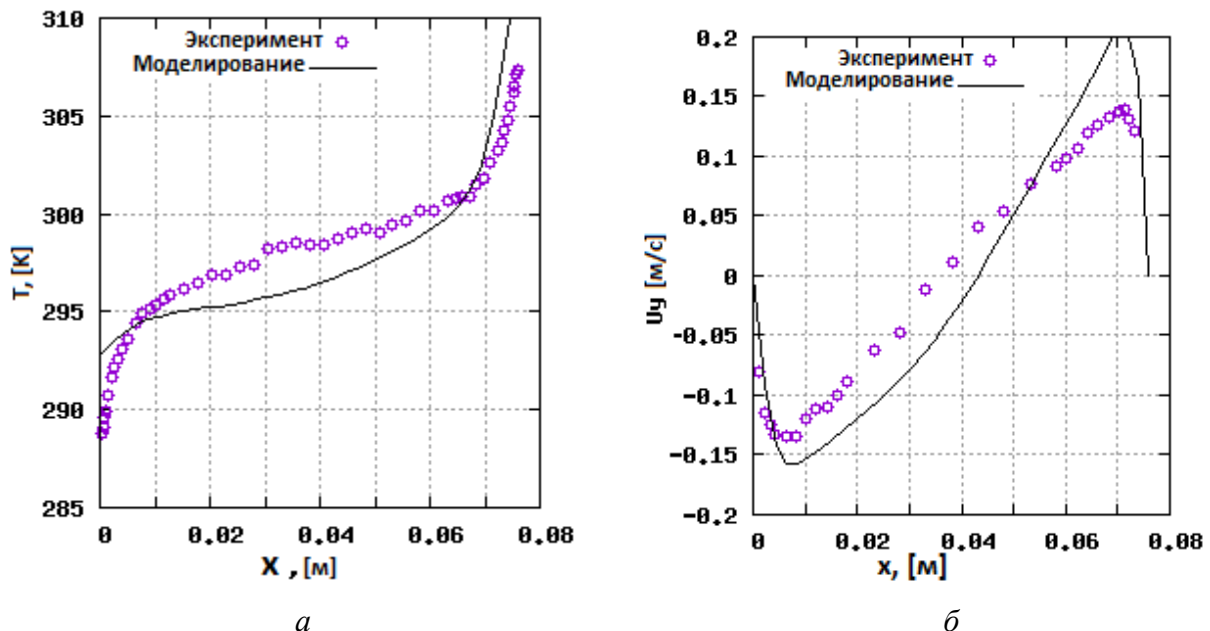
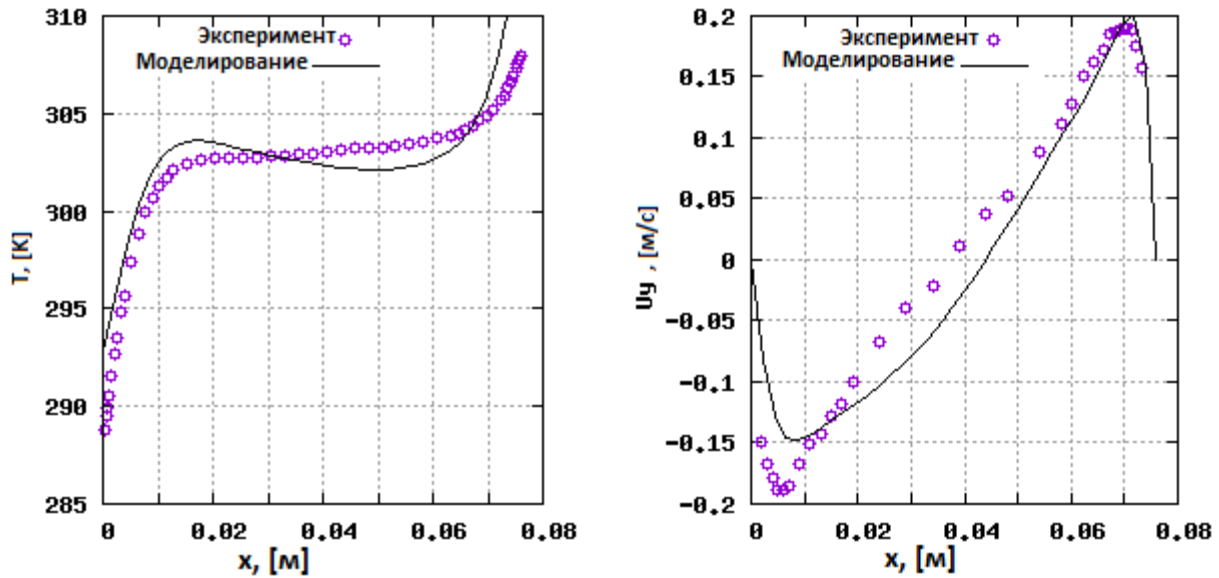


Рис. 2. Профили: а – температуры; б – вертикальной скорости на высоте 0,5 Н в ламинарном режиме

Как видно из рис. 2, для ламинарного режима отклонение результатов моделирования задачи свободной конвекции в *OpenFOAM* от экспериментальных составляет в среднем 20 %, а для турбулентного (рис. 3) – не более 30 %.



а

б

Рис. 3. Профили: а – температуры; б – вертикальной скорости на высоте 0,5 Н в турбулентном режиме

Моделирование задачи конвекции-диффузии

Еще один не менее важный процесс при моделировании гидротермального синтеза – процесс переноса вещества. Математическая модель, позволяющая его описать, представляет собой уравнение конвекции-диффузии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\rho_p = D_p\Delta\rho_p \\ \frac{\partial \rho_{pil}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\rho_{pil} = D_{pil}\Delta\rho_{pil} \end{cases},$$

где ρ_p – плотность вещества частиц; ρ_{pil} – плотность растворенных в жидкости частиц; \vec{v} – вектор скоростей, полученный при решении конвективной задачи; D – коэффициент диффузии.

Для моделирования использовалась конфигурация, представленная на рис. 4. На дне автоклава насыпаны крупные частицы синтезируемого материала. На высоте двух сантиметров от дна располагается нагреватель.

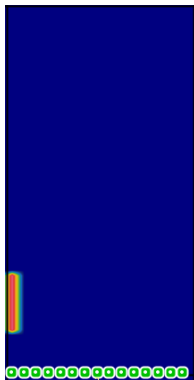


Рис. 4. Конфигурация задачи для моделирования переноса частиц

При включении нагрева внутри автоклава возникает конвективное движение жидкости, если частицы вещества будут иметь достаточно малую массу, то конвективные потоки их подхватят и распределят по объему автоклава. На рис. 5а, представлено поле температуры и распределение частиц через 30 с после включения нагревателя. Видно, что в предлагаемом модельном случае масса частиц достаточно мала и конвективные потоки, подхватывают их и распределяют по объему сосуда.

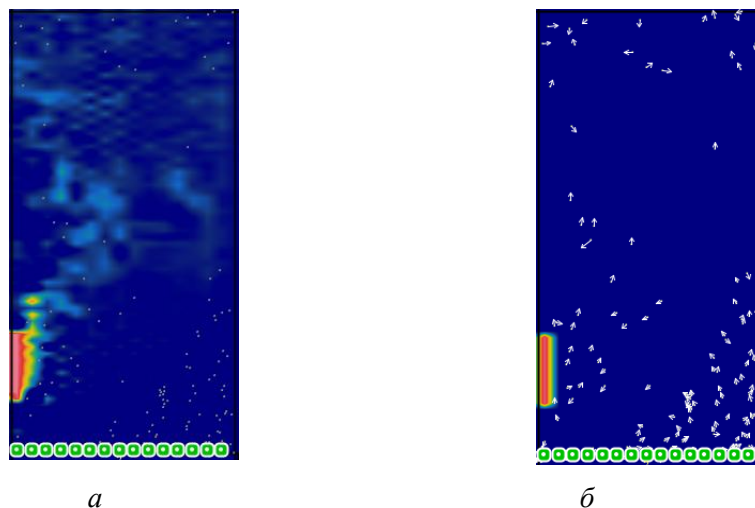


Рис. 5. Результаты моделирования: а – перенос частиц через 30 с после включения нагревателя; б – векторы направлений скорости частиц

Заключение

Построена математическая модель конвективного тепло- и массопереноса, которая на качественном уровне совпадает с характерными зависимостями, полученными экспериментально. Предложенная модель показывает устойчивость в ламинарном и турбулентном режимах конвекции. Сравнение результатов с классическими экспериментальными результатами в этой области дает отклонение не более 10 %.

Публикации

1. Манухин Б.Г., Гусев М.Е., Кучер Д.А., Чивилихин С.А., Андреева О.В. Оптическая диагностика процесса свободной конвекции жидкости // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119. № 3. С. 418–423.
2. Kucher D.A., Chivilikhin S.A., Popov I.Y., Gusarov V.V. Two-scale model of hydrothermal synthesis of nanotubes // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 541. No 1. P. 012013.
3. Kucher D.A., Manukhin B.G., Andreeva O.V., Chivilikhin S.A. Modelling natural convection of fluid in cuvette // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 536. No 1. P. 012006.

Литература

1. Zhang P., Gao L. Cadmium sulfide nanocrystals via two-step hydrothermal process in microemulsions: synthesis and characterization // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. Vol. 266. No 2. P. 457–460.
2. Hussein A.K. Applications of nanotechnology in renewable energies – A comprehensive overview and understanding // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 460–476.
3. Huang W.K. et al. Carbon nanomaterials synthesized using a spray pyrolysis method // Vacuum. 2015. Vol. 118. P. 94–99.
4. Берковский Б.М., Полевиков В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции. Минск, 1988. – 167 с.

5. ERCOFTAC Classic Database Collection [Electronic resource]. URL: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac> (accessed: 12.11.16).
6. OpenFOAM User Guide [Electronic resource] // CFD Direct: The Architects of OpenFOAM [Official website]. URL: <http://cfd.direct/openfoam/user-guide> (accessed: 12.11.16).
7. OpenFOAM resources [Electronic resource] // OpenFOAM: The OpenFOAM Foundation [Official website]. URL: <http://www.openfoam.org/docs> (accessed: 12.11.16).



Лаврентьева Галина Михайловна
факультет информационных технологий и программирования
Кафедра речевых информационных систем
E-mail: lavrentyeva@speechpro.com

МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АТАК НА ГОЛОСОВЫЕ БИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ЦЕЛЬЮ ВЗЛОМА

Г.М. Лаврентьева

Научный руководитель – доцент К.К. Симончик

Цель проекта – разработка методов автоматического детектирования спуфинг-атак на голосовые биометрические системы, наиболее эффективно решающих отдельную задачу детектирования атаки без учета влияния детектора на биометрическую систему верификации в целом. Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- подготовлены и проанализированы базы для обучения и тестирования методов детектирования спуфинг-атак;
- изучены существующие источники литературы, описывающие методы и алгоритмы автоматического детектирования спуфинг-атак, и проведен анализ достоинств и недостатков рассмотренных методов и алгоритмов;
- изучены различные признаковые пространства для определения надежных и устойчивых методов детектирования спуфинг-атак на голосовые биометрические системы;
- разработаны системы автоматического детектирования спуфинг-атак;
- проведены численные эксперименты на тестовых данных с целью оценки уровня ошибок разработанных систем и сравнения их с оценками существующих систем;
- проведен анализ полученных результатов экспериментов.

Все представляемые системы состоят из трех компонентов: модуля извлечения информативных акустических признаков, модуля извлечения i -векторов в пространстве полной изменчивости и классификатора. Общая схема систем представлена на рис. 1.

В рамках проведения экспериментов был сделан вывод о целесообразности применения преддетектора как предварительного шага детектирования атак, который проверяет входной сигнал на наличие нулевых значений энергии. В случае обнаружения последовательности нулей, входной сигнал объявляется спуфинг-атакой, в противном случае сигнал поступает на вход модуля извлечения акустических признаков.

Модули извлечения акустических признаков, использованные в системах, представляют собой комбинацию нескольких различных методов извлечения речевых

характеристик из входного сигнала. Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность использования комбинаций признаков, основанных на амплитудно-спектральной и фазовой информации.

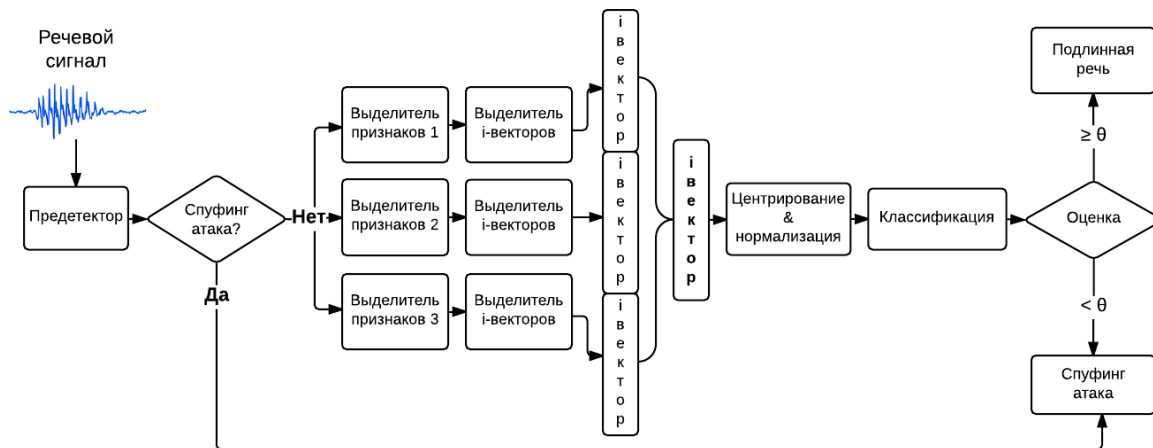


Рис. 1. Общая схема системы автоматического детектирования спуфинг-атак

В качестве краткосрочных амплитудных спектральных акустических признаков были выбраны мел-частотные коэффициенты, полученные двумя способами. Мел-частотные кепстральные коэффициенты (*MFCC*) [1] были получены с помощью дискретного косинусного преобразования, в то время как мел-частотные кепстральные коэффициенты второго типа – с помощью метода главных компонент. Они получили название мел-частотных главных коэффициентов (*Mel Frequency Principal Coefficients, MFPC*). Эти признаки хорошо отображают общие характеристики голосового тракта. Были использованы первые 12 коэффициентов вместе с их первыми и вторыми производными как наиболее информативные признаки. Таким образом, получился вектор признаков длиной в 36 элементов. *MFPC*-коэффициенты были получены аналогично *MFCC*-коэффициентам, но с помощью метода главных компонент (вместо дискретного косинусного преобразования) для декорреляции информативных акустических признаков.

С целью добавить в рассмотрение фазовую информацию речевого сигнала были использованы фазовые признаки *CosPhase*, подробно описанные в [2]. Они выделены из фазового спектра следующим способом:

- фазовый спектр сглаживался, для получения непрерывной функции от частоты;
- скорректированный фазовый спектр был нормирован функцией косинуса для ограничения его области значений до $[-1; 1]$;
- для понижения размерности использовался метод главных компонент, базис которого был вычислен заранее на обучающем множестве.

Аналогично признакам, выделенным из амплитудного спектра, рассматривались первые 12 коэффициентов с их первыми и вторыми производными, которые образовали результирующий вектор косинусно-фазовых главных коэффициентов (*CosPhase Principal Coefficients, CosPhasePC*).

Также хорошие результаты показали системы, использующие вейвлет-преобразование, адаптированное к мел-шкале. Вместо обычной энергии частотных подполос применялся оператор энергии Тегера – Кайзера (ТКЕ). Энергия ТКЕ обладает большей информативностью, по сравнению с обычной энергией отсчета, и является помехоустойчивым параметром для речевых сигналов [3]. Использовалась следующая формула для расчета ТКЕ (Ψ):

$$\Psi(s(t)) = s(t)^2 - s(t-1)s(t+1) \quad (1)$$

где $s(t)$ – временной отсчет выходного сигнала рассматриваемой подполосы.

Для декорреляции полученных признаков последовательно применялся метод главных компонент и получались 12 коэффициентов. Эти признаки для краткости были названы мел-частотными вейвлет-пакетными коэффициентами (*Mel Wavelet Packet Coefficients, MWPC*). Здесь также принимались во внимание первые и вторые производные.

Полученные векторы акустических признаков подаются на вход модулю извлечения i -векторов для каждого типа акустических признаков. Они образуют один общий i -вектор, после чего он центрируется и нормируется по длине. Для моделирования вероятностного пространства акустических признаков был использован стандартный подход *TV-JFA*, являющийся одним из самых современных в области голосовой верификации [4, 5].

В пространстве полной изменчивости (*Total Variability, TV*) i -вектор извлекается посредством применения обычного Гауссова факторного анализатора, определенного на средних супервекторах универсальной фоновой модели (*Universal Background Model, UBM*) и матрицы полной изменчивости T [6]. Модель голоса в *TV*-методе имеет вид:

$$M = m + Tw, \quad (2)$$

где M – супервектор смеси гауссовских распределений (*GMM*-модели) фонограммы, m – супервектор универсальной фоновой модели (*Universal Background Model, UBM*), w – низкоразмерный вектор, T – матрица полной изменчивости.

В представленных системах *UBM* была представлена смесью гауссовых моделей описанных признаков. Для обучения T -матрицы и *UBM* использовались признаки, полученные на обучающей базе конкурса. Диагональная ковариационная *UBM* была обучена с помощью *EM*-алгоритма (*Expectation – Maximization*) [7].

Финальным модулем является классификатор, который вычисляет результирующую оценку принадлежности речевого сигнала к классу спуфинга или к классу подлинной речи. В данном исследовании сравнивались системы детектирования спуфинг-атак, использующие различные классификаторы.

В исследованиях использовался *SVM*-классификатор с линейным ядром. Разделяющая гиперплоскость была построена в нормализованном по длине пространстве i -векторов обучающей базы конкурса *ASVspoof Challenge 2015* для детектирования спуфинг-атак. Для обучения *SVM* использовалась библиотека *LIBLINEAR* [8], обеспечившая необходимую точность и вычислительную скорость.

В качестве альтернативного подхода использовался *DBN*-классификатор с *softmax* выходным слоем и стохастическими бинарными скрытыми слоями [9]. *DBN* принимает на вход нормированные общие i -вектора, полученные от модуля извлечения i -векторов. Мы использовали послойное предварительное обучение слоев ограниченными машинами Больцмана (*Restricted Boltzmann Machines, RBM*) [9], после чего применяли метод обратного распространения для обучения *DBN* с учителем для детектирования речи и спуфинг-атак.

Для проведения экспериментов и разработки методов использовались базы данных конкурса *ASVspoof Challenge 2015* [10]. Обучающая база содержала в себе 3 750 записей реальной речи и 12 625 записей попыток взлома, собранных от 25 дикторов (10 мужчин, 25 женщин). База данных для разработки в свою очередь содержала 3 497 записей естественной речи 35 дикторов (15 мужчин и 20 женщин) и 49 875 попыток взлома. Для создания записей с попытками взлома использовались пять различных методов спуфинг-атак (именуемых далее известными атаками) в силу простоты их реализации. Среди них было три метода преобразования речи диктора ($S1$, $S2$ и $S5$) и два метода синтеза человеческой речи ($S3$ и $S4$).

Для оценки качества системы автоматического детектирования атак использовался равный уровень ошибок (коэффициент *EER*) – это коэффициент, при котором ошибки приема и отклонения эквивалентны.

В Табл. 1 представлены результаты оценки уровня равновероятной ошибки EER на тестовом множестве для систем верификации на основе TV - SVM -метода при использовании различных акустических признаков, описанных ранее. Данные результаты получены с применением UBM с 256 компонентами и i -векторов размерностью 200.

Таблица 1

Результаты для TV - SVM -систем на различных спуфинг-атаках, $EER(\%)$

Признаки	Вариант спуфинг атаки					Среднее
	S1	S2	S3	S4	S5	
MFCC	0,38	2,13	0,36	0,39	1,48	1,14
MFPC	0,13	0,29	0,09	0,09	0,37	0,23
CosPhasePC	0,13	0,20	0,04	0,05	0,23	0,15
MWPC	0,03	0,11	0,00	0,00	0,08	0,05

Результаты показывают, что $MFCC$ -признаки уступают остальным рассматриваемым признакам. Следует отметить, что замена дискретно-косинусного преобразования в $MFCC$ на декоррелирующий базис главных компонент и переход к $MFPC$ демонстрирует существенное улучшение показателя EER для всех вариантов спуфинга. Использование фазовых признаков $CosPhasePC$ дает небольшие улучшения EER по сравнению с $MFPC$. А наилучший результат демонстрируют признаки на основе мультиразрешающего вейвлет-преобразования, достигая 0,05 % EER для всех известных методов атак. Стоит отметить, что в ходе экспериментов было выявлено, что применение оператора ТКЕ в $MWPC$ демонстрирует немного лучший результат по сравнению с обычной энергией.

Результаты сравнения показали, что линейные SVM -классификаторы превосходят стандартные, основанные на смеси гауссовых распределений. Сравнение линейного SVM -и нелинейного DBN -классификаторов с использованием $MFCC$, $MFPC$ и $CosPhasePC$ -признаков показало, что EER -системы на SVM -классификаторе достигают 0,03 % EER на тестовой базе, что несколько лучше 0,04 % EER системы на DBN -классификаторе.

Основываясь на результатах проведенных экспериментов, были предложены три системы автоматического детектирования спуфинг-атак.

Основная система, согласно схеме на рис. 1, содержала преддетектор и модули выделения $MFCC$, $MFPC$ и $CosPhasePC$ -признаков. UBM была представлена смесью 1024 гауссовских моделей описанных признаков, а размерность TV -пространства была равна 400. Для классификации использовался классификатор SVM .

В первой альтернативной системе не использовался преддетектор, а $MFPC$ -признаки были заменены на $MWPC$.

Вторая альтернативная система также не использовала преддетектор, а для классификации был применен нелинейный DBN -классификатор. С целью избежать переобучения количество компонент UBM было понижено до 256 для всех акустических признаков, а размерность TV -пространства – до 200.

Дополнительно к известным типам атак тестовая база содержала спуфинг-атаки неизвестных методов $S6$ - $S10$ [20]. Значения EER на тестовой базе представлены в Табл. 2 и Табл. 3.

Таблица 2

Результаты экспериментов на тестовой базе, $EER(\%)$

Система	Известные атаки	Неизвестные атаки	Все
Основная	0,008	3,922	1,965
Альтернативная 1	0,009	4,891	2,450
Альтернативная 2	0,017	6,162	3,090
Основная (без преддетектора)	0,008	5,151	2,579

Таблица 3

Результаты экспериментов на тестовой базе для различных типов спуфинг-атак, EER (%)

Алгоритм спуфинг-атаки (S1–S5 – известные, S6–10 – неизвестные)	Система		
	Основная	Альтернативная 1	Альтернативная 2
S1	0,004	0,005	0,000
S2	0,022	0,022	0,058
S3/S4	0,000	0,000	0,000
S5	0,013	0,020	0,029
S6/S7	$\leq 0,019$	$\leq 0,024$	$\leq 0,046$
S8	0,015	0,014	0,124
S9	0,004	0,006	0,005
S10	19,571	24,401	30,636
Все	1,965	2,450	3,090

Несмотря на хорошие результаты на известных видах атак, результаты, полученные для неизвестных видов спуфинга, оказались заметно хуже: даже лучшая предложенная (основная) система позволила достичь только $EER = 3,92$ %. Эта оценка подтверждает необходимость улучшения мер противодействия спуфинг-атакам неизвестных типов.

Основная система показала наилучший результат, в частности за счет применения предетектора по энергии, что подтверждают результаты сравнения EER основной системы с предетектором и без. Описанный предетектор не будет работать в условиях канальных искажений и аддитивных шумов.

В отличие от основной, первая альтернативная система не имела предетектора, и показала относительные хорошую эффективность. Причина этого заключается в использовании $MWPC$ -признаков. В их основе лежит вейвлет-разложение, которое позволяет проводить детальный мультиразрешающий анализ сигналов, что дает дополнительный выигрыш в решении задачи антиспуфинга.

Результат второй альтернативной системы на основе DBN -классификатора оказался наихудшим. Возможно, здесь не удалось избежать эффектов более сильного переобучения DBN -классификатора на обучающем множестве, по сравнению с SVM . На основании этих выводов можно заключить, что в предложенной системе антиспуфинга целесообразнее использовать линейный SVM -классификатор.

Заключение

В ходе выполнения данной работы было проведено комплексное исследование применимости пространства акустических признаков и эффективности различных классификаторов в решении задачи автоматического детектирования спуфинг-атак. Предложенные системы были основаны на TV -моделировании в пространстве различных признаков и использовании линейного SVM -классификатора или нелинейного DBN .

В рамках исследования были протестированы различные варианты акустических признаков для определения надежных и устойчивых контрмер для задачи антиспуфинга. Проведенные эксперименты показали, что использование фазовых и вейвлет-признаков вносит существенный вклад в эффективность результирующих систем. Наименьшее значение EER , достигнутое на тестовой базе, равно 1,965 % для всех типов спуфинг-атак.

Предложенные системы участвовали в конкурсе *ASVspoof Challenge 2015* [10], где основная система достигла второго по качеству результата на конкурсной базе.

Описанные системы могут быть использованы в системах автоматической верификации дикторов по голосу для детектирования атак с целью взлома.

Публикации

1. *Lavrentyeva G.M., Novoselov S.A., Simonchik K.K.* Anti-spoofing methods for automatic speaker verification system // Analysis of Images, Social Networks and Texts: 5th International Conference AIST 2016. Revised Selected Papers. 2016. Vol. 661. P. 172–184.
2. *Лаврентьева Г.М.* Методы противодействия спуфинг атак на голосовые биометрические системы // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 3. СПб., 2016. С. 93–95.
3. *Лаврентьева Г.М.* Современные методы детектирования спуфинг атак на голосовые биометрические системы [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2015. URL: http://kmu.ifmo.ru/collections_article/2849/sovremennye_metody_detektirovaniya_spufig_atak_na_golosovye_biometricheskie_sistemy.html (дата обращения: 15.03.2017).
4. *Shchemelinin V.L., Kozlov A.V., Lavrentyeva G.M., Novoselov S.A., Simonchik K.K.* Vulnerability of voice verification system with STC anti-spoofing detector to different methods of spoofing attacks // Speech and Computer: 17th International Conference SPECOM 2015. Proceedings. 2015. Vol. 9319. P. 480–486.
5. *Novoselov S.A., Kozlov A.V., Lavrentyeva G.M., Simonchik K.K., Shchemelinin V.L.* STC anti-spoofing systems for the ASVspoo 2015 Challenge // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2016. P. 5475–5479.
6. *Lavrentyeva G.M., Kozlov A.V., Novoselov S.A., Simonchik K.K., Shchemelinin V.L.* Automatically trained TTS for effective attacks to anti-spoofing system // Speech and Computer: 17th International Conference SPECOM 2015. Proceedings. 2015. Vol. 9319. P. 137–143.

Литература

1. *Ganchev T. et al.* Comparative evaluation of various MFCC implementations on the speaker verification task // Speech and Computer: 10th International Conference SPECOM 2005. Proceedings. 2005. Vol. 1. P. 191–194.
2. *Wu Z. et al.* Detecting converted speech and natural speech for anti-spoofing attack in speaker recognition // Interspeech 2012: 13th Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2012. P. 1700–1703.
3. *Ying G.S. et al.* Endpoint detection of isolated utterances based on modified Teager energy measure // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1993. Vol. 2. P. 732–735.
4. *Novoselov S.A. et al.* STC speaker recognition system for the NIST i-vector challenge // Proceedings Odyssey 2014: The Speaker and Language Recognition Workshop. 2014. P. 231–240.
5. *Wu Z. et al.* Spoofing and countermeasures for speaker verification // Speech Communication. 2015. Vol. 66. P.130–153.
6. *Yamagishi J. et al.* Analysis of speaker adaptation algorithms for HMM-based speech synthesis and a constrained SMAPLR adaptation algorithm // IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing. 2009. Vol. 17. No 1. P. 66–83.
7. *Hastie T. et al.* The elements of statistical learning. Springer, 2001, P. 236–243.
8. LIBLINEAR: A Library for large linear classification [Электронный ресурс]. URL: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/liblinear> (дата обращения: 03.02.2015).
9. *Hinton G.E. et al.* A fast learning algorithm for deep belief nets // Neural Computation. 2006. Vol. 18. No 7. P. 1527–1554.
10. ASVspoo 2015: the first automatic speaker verification spoofing and countermeasures challenge [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spoofingchallenge.org> (дата обращения: 03.02.2015).



Лавров Владимир Сергеевич
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: vladimir8812@mail.ru

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ БУКСИРУЕМАЯ АНТЕННА

В.С. Лавров

Научный руководитель – доцент А.В. Куликов

Цели проекта – разработка и последующее изготовление работоспособного макета волоконно-оптической геодезической антенны (ВО ГБА).

Для выполнения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

- построена математическая модель работы распределенного гидроакустического волоконно-оптического датчика (ГА ВОД) для ВО ГБА;
- выбрана, рассчитана и собрана оптическая схема ВО ГБА;
- проведены исследовательские испытания макета ВО ГБА – анализировалась акустическая чувствительность на воздухе в заглушенной камере.

Построение модели распределенного ГА ВОД проводилось в программе для моделирования физических процессов *"Comsol Multiphysics" Acoustic Module*. Исследуемая модель представляет собой внутренний цилиндр с механическими параметрами материала кабельной основы, внешний цилиндр с механическими параметрами материала акустического слоя, а также спираль, расположенную на внешней стороне этой структуры, имитирующую оптическое волокно (ОВ), по деформации которой рассчитана чувствительность ОВ.

Исследование акустической чувствительности проводилось в частотной области от 5 до 505 Гц с шагом 100 Гц и амплитудой 1 Па. На рис. 1 представлены результаты, полученные в ходе моделирования, где на кабельной структуре цветом обозначена ее деформация, красный – максимальное значение, а синий – минимальное.

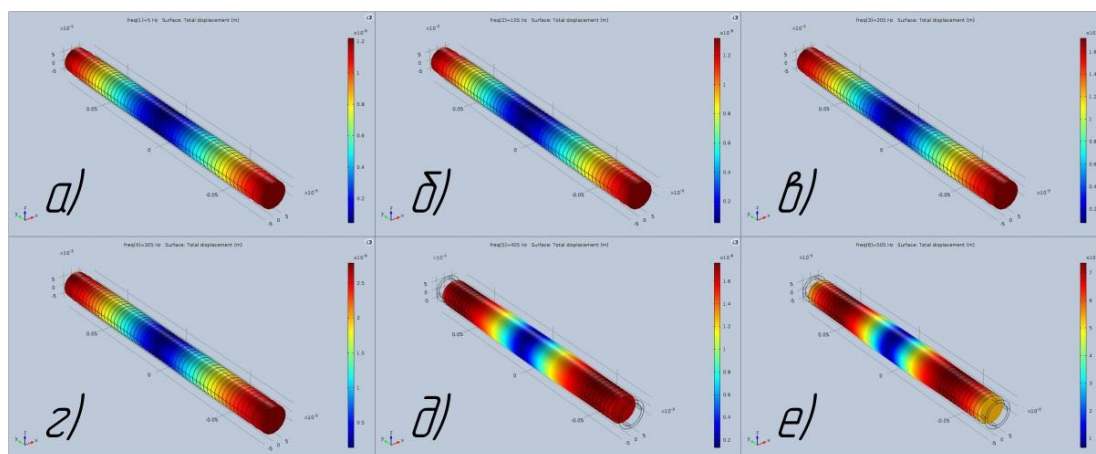


Рис. 1. 3d-представление полученных результатов: а – частота 5 Гц; б – частота 105 Гц; в – частота 205 Гц; г – частота 305 Гц; д – частота 405 Гц; е – частота 505 Гц

По полученным данным была рассчитана акустическая чувствительность ГА ВОД.

График приведен на рис 2.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

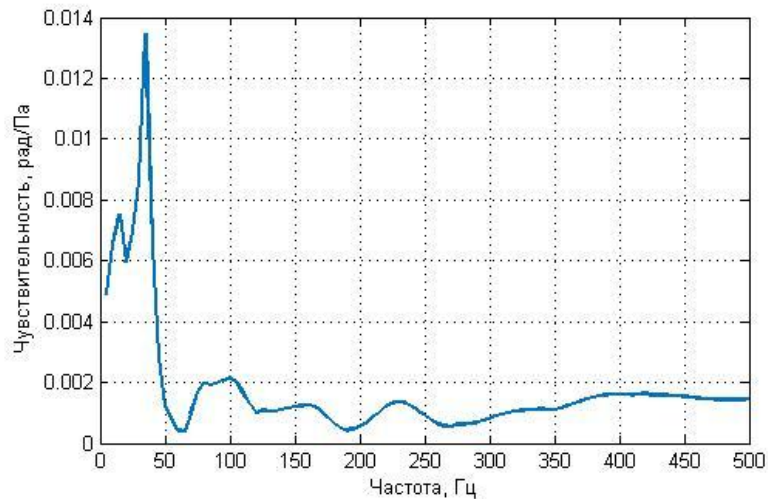


Рис. 2. Рассчитанная чувствительность ГА ВОД

Как видно из модели, ГА ВОД имеет выраженный резонанс в области низких частот < 50 Гц, что обусловлено его геометрическими параметрами.

Выбранная оптическая схема представлена на рис. 3. Она состоит из двух частей – оптического блока обработки сигналов, который представляет собой интерферометр Майкельсона, входящий в состав бортовой аппаратуры, и забортную пассивную буксируемую антенну.

Приведенная на рис. 3 оптическая схема ВО ГБА работает следующим образом: оптическое излучение, испускаемое лазерными диодами ($\lambda_1 - 1550$ нм и $\lambda_2 - 1564$ нм), дойдя до забортной части антенны, будет частично отражаться от решеток Брэгга, записанных в чувствительное волокно, пропорционально ее коэффициенту отражения и центральной длины волны брэгговского резонанса. Коэффициенты отражения для массива волоконных брэгговских решеток (ВБР) на одну длину волны равны 3 %, 12,1 %, 16,1 %, 22,8 % и 38,3 %. Например, отразившись от первой ВБР(λ_1), оптическое излучение с длиной волны λ_1 также и пойдет, отразится от следующей ВБР(λ_1) и т. д. В итоге при посылке одного импульса по оптическому волокну, в котором записан массив из пяти решеток, в обратную сторону придет пакет из пяти импульсов. В интерферометре Майкельсона соседние импульсы сведутся по времени, и мы будем наблюдать четыре значащих интерференционных пика. На рис. 4 приведена реальная осциллограмма с интерференционными импульсами.

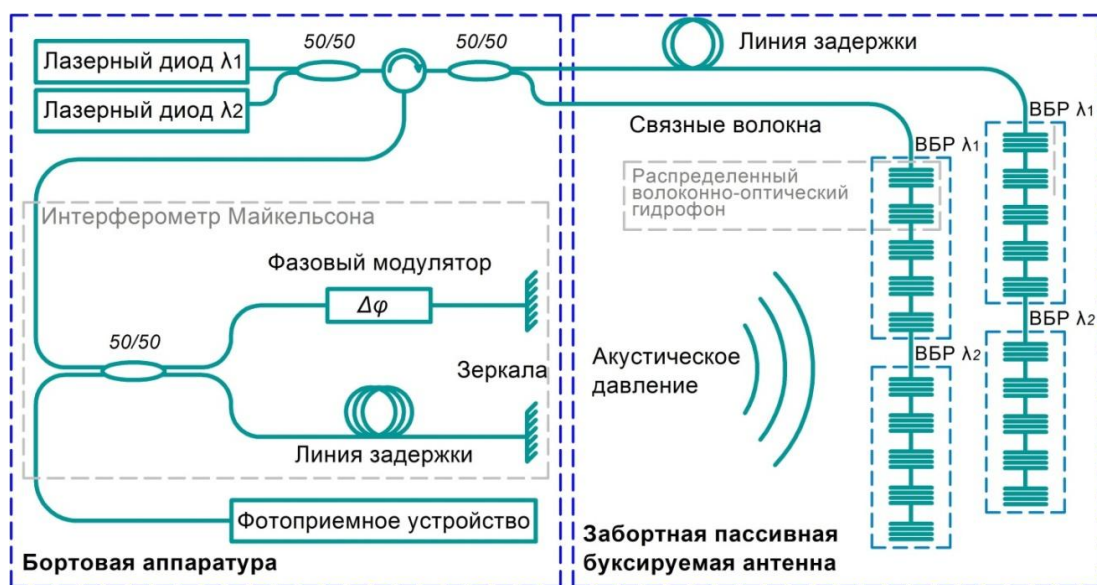


Рис. 3. ВО ГБА на волоконных брэгговских решетках

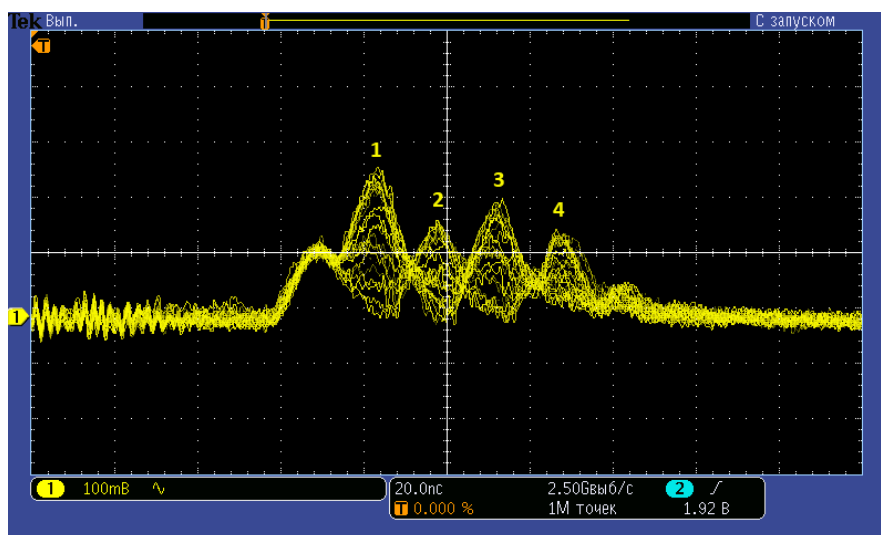


Рис. 4. Снимок с осциллографа

В рамках данной работы был собран акустооптический кабель макета ВО ГБА, с помощью которого были проведены исследовательские испытания макета на акустическую чувствительность в заглушенной камере. ВО ГБА располагалась на шестнадцати штативах вокруг источника акустических волн, как показано на рис. 5. Измерения проводились на частотах 5, 15, 40, 95, 205, 280, 405 и 495 Гц.

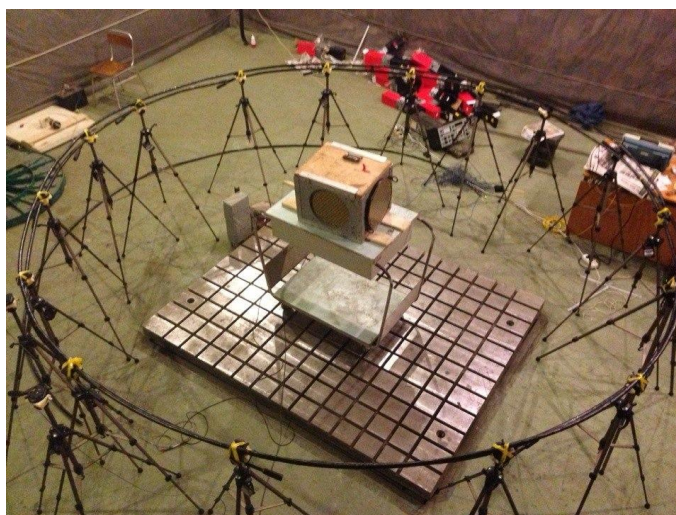


Рис. 5. Фотография расположения оборудования в безэховой камере

На рис. 6 представлен график среднего значения чувствительности ГА ВОД на каждой измеренной частоте для всех датчиков. Как видно из результатов исследования, ГА ВОД имеют выраженный резонанс в области низких частот <math>< 50</math> Гц, что повторяет данные, полученные в результате его моделирования.

Разработанный ВО ГБА имеет большой практический потенциал во многих областях исследования и контроля окружающего пространства:

- в геофизической разведке полезных ископаемых;
- при контроле морской транспортной инфраструктуры;
- при мониторинге состояния железнодорожных и транспортных магистралей;
- в системах охраны периметра предприятий и частных объектов;
- в рыбопромысловой гидроакустике.

Полученные результаты могут быть использованы для построения ВОД других назначений: промышленного производства, гражданского машиностроения.

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

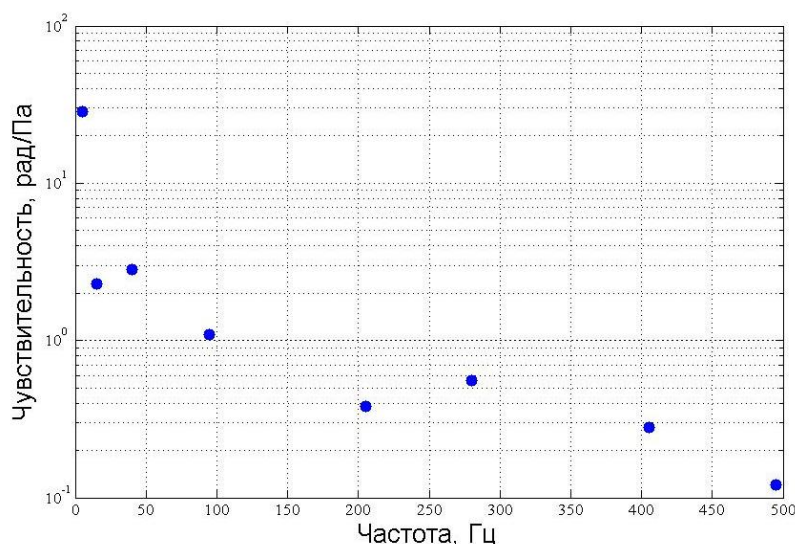


Рис. 6. Средняя чувствительность ГА ВОД на измеренных частотах

Заключение

В ходе проведения работы были выполнены все поставленные задачи:

- построена модель работы распределенного ГА ВОД для ВО ГБА;
- выбрана и собрана оптическая схема ВО ГБА;
- осуществлен подбор материалов для создания акустооптического кабеля;
- собран работоспособный макет ВО ГБА на 16 датчиков;
- проведены исследовательские испытания макета ВО ГБА.

В результате достигнута цель проекта: разработан и собран работоспособный макет ВО ГБА на 16 датчиков с чувствительностью в области частот до 200 Гц не ниже чем 0,3 рад/Па.

Публикации

1. Ефимов М.Е., Плотников М.Ю., Мехреньгин М.В., Лавров В.С. Исследование характеристик направленности сдвоенного волоконно-оптического гидрофона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6. С. 1015–1020.
2. Ефимов М.Е., Плотников М.Ю., Лавров В.С., Куликов А.В., Егорова Д.А., Терехова Н.А. Методы увеличения чувствительности волоконно-оптических интерферометрических датчиков // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Sensorica – 2015». СПб., 2015. С. 106–107.
3. Лавров В.С., Куликов А.В., Плотников М.Ю., Ефимов М.Е., Варжель С.В. Исследование влияния параметров покрытия оптического волокна на его акустическую чувствительность // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2015». СПб., 2015. С. 455–456.
4. Погорелая Д.А., Дейнека И.Г., Шуклин Ф.А., Смоловик М.А., Лавров В.С., Волковский С.А. Псевдогетеродинная демодуляция сигнала фазовых волоконно-оптических интерферометрических датчиков // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Sensorica – 2014». СПб., 2014. С.77–78.
5. Lavrov V.S., Kulikov A.V., Plotnikov M.U., Efimov M.E., Varzhel' S.V. Study of influence of the fiber optic coatings parameters on optical acoustic sensitivity // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012014.
6. Заявка на изобретение 2015136607 Российская Федерация. Акустооптический волоконный кабель и способ его изготовления / А.В. Куликов, И.А. Соколов, И.К. Мешковский, В.С. Лавров, Д.М. Инденбаум. Опубл. 27.08.2015.



Лашков Игорь Борисович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра информационных систем
E-mail: igor-lashkov@ya.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОДИТЕЛЕЙ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ИХ ОБ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА ДОРОГАХ

И.Б. Лашков

Научный руководитель – доцент А.М. Кашевник

Цель проекта – разработка алгоритмов распознавания основных характеристик лица человека с целью анализа небезопасного состояния водителя и предупреждения об аварийной ситуации. Алгоритмы предназначены для мобильного сервиса автоматизированной поддержки водителя транспортного средства (ТС) на платформе *Android*. Задача мобильного сервиса – обеспечение безопасности водителей. Он прогнозирует небезопасные состояния за рулем транспортного средства и предупреждает водителей о них. В работе рассмотрены опасные состояния сонливости и рассеянности. Используя алгоритмы компьютерного зрения и машинного обучения, приложение на телефоне следит за водителем и определяет возможное небезопасное состояние при помощи фронтальной камеры смартфона.

Введение

Многие водители за рулем автомобиля испытывают чувство усталости или сонливости и даже не подозревают об этом. Отслеживание опасного поведения за рулем может помочь обратить внимание водителей на стиль своего вождения и связанные с этим риски, тем самым снизить процент неосторожного вождения и улучшить навыки безопасного поведения на дороге.

Понятие «вождение в полусонном состоянии», возможно, звучит несерьезно, но количество несчастных случаев, вызванных засыпанием водителя за рулем, с каждым годом уносит все больше жизней и приводит к травматизму. Вождение в состоянии сонливости настолько же опасно, как и вождение в состоянии алкогольного опьянения, о чем свидетельствует анализ числа травм и смертей, полученных в результате этого. Заснул водитель за рулем или же у него замедлилась скорость реакции – все это в равной мере может привести к серьезным опасным последствиям.

Современные системы содействия водителю (*ADAS – Advanced Driver Assistance Systems*) нацелены на оказание ему помощи и недопущение дорожно-транспортных происшествий (ДТП) или смягчение их последствий. Этими системами подаются предупреждающие сигналы высокой приоритетности для стимулирования бдительности водителя, которые побудят его принять своевременные меры, если существует опасность гибели людей или возникновения серьезных повреждений.

Рассмотрим распознавание следующих небезопасных дорожных ситуаций: сонливость водителя, усталость и несоблюдение дистанции до впереди идущего ТС, а также небезопасную смену полосы движения. Они выявляются с помощью набора индикаторов, характеризующих ментальное состояние водителя, основываясь на физических величинах в момент времени t . Чтобы предвидеть небезопасный маневр со стороны водителя, происходит анализ контекста информации, получаемой с камер и сенсоров мобильных

телефонов (с фронтальной камеры, направленной на слежение за поведением водителя; с тыловой камеры, направленной на слежение за дорожной обстановкой; с акселерометра, гироскопа, магнетометра) и благодаря использованию GPS-сигнала.

Можно выявить следующие физиологические признаки, которые измеряют невнимательность, усталость или сонливость водителя ТС: доля времени, когда глаза закрыты (*PERCLOS* – *PERcentage of eye CLOSure*), зевота, кивание головой, частота и скорость моргания век.

Сонливость – это чувство усталости, эффект слипания глаз, являющееся следствием нарушения сна и сопровождающееся постоянным или периодическим желанием уснуть во время, не предназначенное для сна. Чрезмерная сонливость снижает бдительность. Скорость реакции замедляется, затрудняется принятие решений, а также понижается внимание, память, страдает координация движений.

PERCLOS [1] – это доля времени, в течение которого по оценкам наблюдателя или соответствующей прикладной программы, веки водителя частично закрыты. Критерием сонливости является состояние, когда глаза закрыты более чем на 80 % в течение одной минуты. В этом случае человек считается дремлющим.

Информация о состоянии водителя, такая как параметр *PERCLOS* и скорость моргания глаза, непрерывно анализируется с помощью фронтальной камеры смартфона. Если параметр *PERCLOS* превышает пороговое значение в 28 %, то можно считать, что водитель находится в состоянии сонливости. Другим индикатором, характеризующим состояние сонливости водителя, является скорость моргания глаз, колеблющаяся в допустимом безопасном диапазоне 0,5–0,8 с для одного моргания.

Следующий индикатор сонливости – зевота. Если в процессе вождения водитель совершает более трех зевков за тридцать минут, значит, он начинает испытывать сонливость.

Одним из заметных признаков сонливости является момент, когда водитель начинает клевать носом, то есть ему становится трудно удерживать голову в нормальном положении. Если количество таких отвлечений от процесса вождения становится более четырех раз за две минуты, водитель начинает дремать за рулем ТС.

При развитии усталости или сонливости моргание глаз может стать более продолжительным и медленным, и/или частота моргания может варьироваться, и/или при моргании веки могут начать опускаться с небольшой амплитудой, например, пока глаза не начинают закрываться до «микроснов» (состояний сна, которые длятся в течение приблизительно 3–5 с или дольше) или до продолжительного сна.

Другим опасным поведением водителя за рулем ТС является невнимательность. Распознаются два вида невнимательного вождения. В первом случае вычисляется позиция головы водителя. Если он не смотрит прямо по направлению движения автомобиля на протяжении 3 с и при этом не совершает поворот, то тогда фиксируется небезопасное состояние.

Во втором случае происходит слежение за траекторией движения ТС, а именно наличием или отсутствием поворота. Если при совершении такого маневра, как поворот ТС, водитель не проверяет дорогу на наличие других ТС (то есть не смотрит по направлению поворота ТС), возникает небезопасная ситуация. Голова водителя считается повернутой, если угол поворота превышает 15°.

Тыловая камера смартфона позволяет следить за дистанцией до впереди идущего ТС. Безопасным расстоянием считается то, которое автомобиль может преодолеть за 2 с [2] при торможении. Следовательно, если оно превышает эту величину, то считается, что водитель находится в опасной ситуации.

Кроме того, тыловая камера следит и за разметкой на дороге. Может быть распознано два вида небезопасной смены полосы движения ТС. В первом случае, если маневр длится более 2 с, что значительно дольше, чем его обычная продолжительность. Во втором случае водитель должен убедиться в безопасности совершения маневра, посмотрев в зеркала

заднего вида ТС и проверив «слепые» зоны. Если водитель не сделал этого или же продолжительность проверок составила менее 3 с, то он находится в опасной ситуации. Голова его считается повернутой налево или направо, если угол поворота больше 15°.

Уведомление водителя о наступлении опасной ситуации

Каждой опасной ситуации соответствует схема рекомендаций по предотвращению дорожно-транспортного происшествия (ДТП). Исходящие уведомления со смартфона о такой ситуации могут быть представлены голосовым уведомлением, звуковым сигналом, вибрацией смартфона, визуальным представлением в виде иконки или текстовым сообщением на его экране.

Эффективными мерами по предотвращению ДТП являются вынужденная остановка ТС, небольшой отдых 15–20 минут или употребление напитка, содержащего кофеин.

Рассмотрим рекомендации по предотвращению ДТП при наступлении состояния сонливости. Если приложение распознает, что водитель находится в состоянии сонливости, начинает проигрываться звуковой сигнал, привлекая тем самым внимание водителя. Кроме того, автоматически запускается поиск близлежащих кафе или отелей. Если водитель находится на загородной трассе, приложение предложит ему остановиться и передохнуть в радиусе 100 км. Если водитель едет по городу, то радиус поиска мест отдыха будет ограничен двадцатью минутами езды. Когда такое место будет найдено, приложение построит маршрут до ближайшего из них. Если на пути водителя нет ни кафе, ни отелей, приложение порекомендует ему включить радио/музыку, начать диалог с пассажирами, не отвлекаясь от управления ТС, проветрить салон автомобиля, напеть себе мелодию или съехать на обочину и немного отдохнуть.

Если же приложение распознает у водителя нарушение внимания, оно просигнализирует о наличии опасной ситуации при помощи голосового сообщения, звукового сигнала и яркой подсветки экрана телефона. Если водитель ведет беседу с пассажирами, приложение проигрывает предупреждающий звуковой сигнал. Если же в салоне ТС у водителя громко играет радио или звучит музыка, приложение посоветует ее приглушить или выключить. Для всех опасных ситуаций приложение воспроизводит предупреждающий звуковой сигнал и включает яркую подсветку телефона.

Реализация прототипа мобильного сервиса

Предложенный подход был апробирован при разработке ADAS-системы для определения двух опасных состояний (сонливости и невнимательности). Система реализована для устройств с ОС *Android 4.0* и выше. Разработка программного кода приложения велась на языке *Java* и *C++* в среде программирования *Intelij IDEA*. Для манипуляции изображениями была использована открытая кросс-платформенная библиотека компьютерного зрения *OpenCV*. Она разработана компанией *Intel* и значительно упрощает программирование в области компьютерного зрения, предоставляя удобный интерфейс для отслеживания и распознавания лиц. Особо ценным компонентом в *OpenCV* является математический аппарат и функциональные возможности по обработке изображений.

Обработка критически важных областей, таких как тип водителя и модель ТС, была выполнена на языках программирования *C* и *C++*, а *JNI*-интерфейсы были реализованы на языке *Java*. Другие архитектурные компоненты, такие как модуль принятия решений, алгоритм переключения камер смартфона и планировщик задач, были разработаны на *Java*. Для каждого кадра, поступающего с фронтальной или тыловой камер смартфона, используется метод, предложенный П. Виола и М. Джонсом [4] в 2001 году, заключающийся в построении каскадного классификатора, каждый уровень которого имеет большее количество проверяемых параметров. Выбор данного алгоритма обоснован тем, что это один из самых популярных, быстрых и эффективных методов для поиска области лица на

изображении. При сканировании изображения регион, отбракованный на первом уровне каскада классификаторов, не подвергается проверке на следующих, а помечается как не содержащий лица. В качестве параметров для классификации используются визуальные особенности изображения – функции, которые рассчитывают разность интенсивностей двух смежных прямоугольных областей изображения. Особенности с наибольшим значением, присущие всем обучающим образцам класса, являются наиболее репрезентативными. Для обучения каскада и отбора таких ключевых особенностей применяется алгоритм *AdaBoost* [5].

Схема обработки изображений, поступающих с фронтальной камеры в реальном времени, представлена на рис. 1. На вход устройства с камеры смартфона поступает исходное изображение. Используя ранее построенные онтологии водителя и ТС [3], при помощи каскадного детектора методом Виолы – Джонса на кадре из видеоряда выделяются признаки и области объектов. Далее *OpenCV* структуры *Rect*, описывающие области распознанных объектов, поступают в модуль анализа данных, где уже принимается решение о наличии той или иной опасной ситуации.

На вход в модуль обработки изображений подается кадр из видеоряда с фронтальной или тыловой камер, а на выходе получаем аудиовизуальные сигналы о возможном возникновении ДТП и рекомендации о том, как их можно предотвратить.

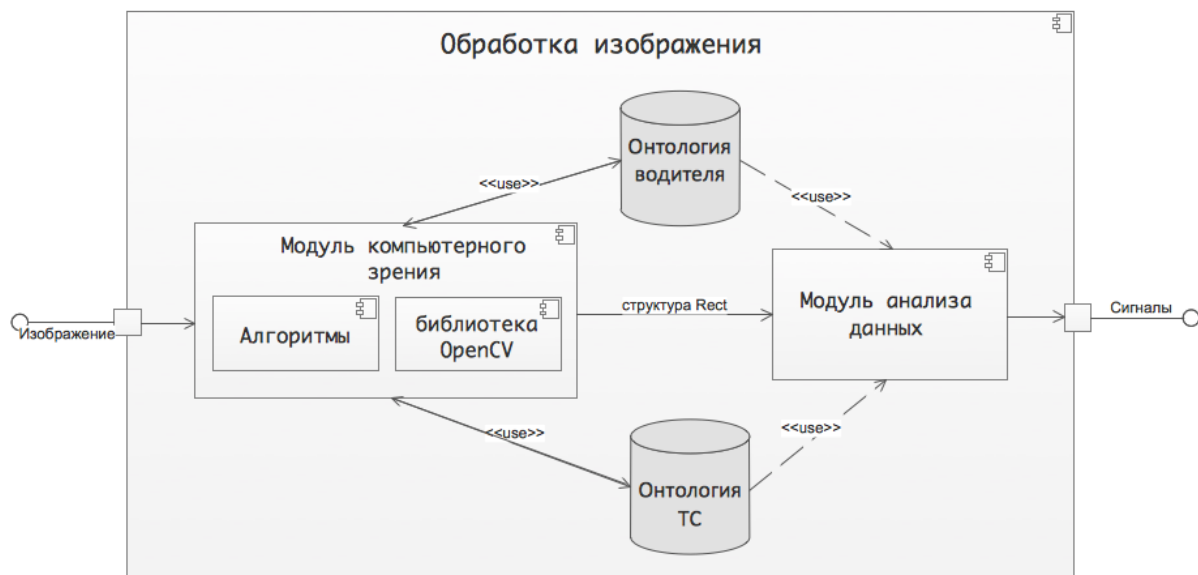


Рис. 1. Схема обработки изображений в реальном времени

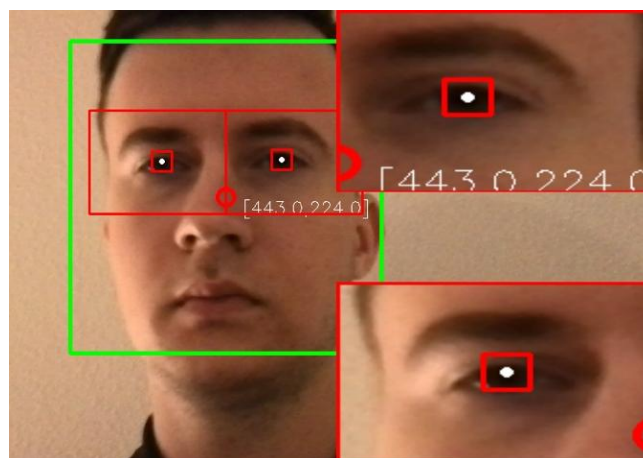


Рис. 2. Результат работы алгоритма поиска и выделения объектов на изображении

На рис. 2 приведен пример поиска и выделения таких объектов, как лицо, глаза и зрачки человека. В ходе эксперимента была задействована фронтальная камера смартфона *Samsung Galaxy S4* с установленной операционной системой *Android* версии 5.0.1. Для распознавания объектов на изображении была использована библиотека компьютерного зрения *OpenCV* версии 2.4.3. Найденное лицо человека обозначено самым большим внешним прямоугольником, глаза – чуть меньшим, а области видимости зрачков – самым маленьким прямоугольником. Центр лица человека обозначен координатами.

Данные с камеры смартфона, такие как положение лица, глаз и зрачков, анализируются в потоковом режиме. В Таблице приведена тестовая выборка из четырех экспериментов, представляющих координаты и размеры найденных областей объектов на изображении, и временная оценка работы алгоритма. Значения переменных X и Y описывают координаты, а W и H – ширину и высоту найденного объекта соответственно. Координаты и размеры объектов на изображении X , Y , W , H представлены в единицах цифровых изображений, пикселях. Как можно заметить, значения как X и Y , так и W и H изменялись на протяжении экспериментов, и это можно объяснить тем, что найденный объект то приближался, то отдалялся в кадре и, соответственно, менялось его расположение. Так, например, в эксперименте № 3 лицо человека отдалялось. Время распознавания также незначительно менялось. Это связано с особенностями работы мобильной платформы *Android* и самим смартфоном, на котором было запущено данное приложение. Можно также отметить, что среднее время обработки одного кадра из видеоряда составляет 75 мс, что позволяет говорить о том, что система работает в реальном времени с точки зрения выполняемых задач пользователя в рамках проектируемого приложения.

Таблица

Значения координат объектов, найденных на изображении

№ экс.	Лицо				Левый глаз				Правый глаз				Левый зрачок				Правый зрачок				Время мс
	X	Y	W	H	X	Y	W	H	X	Y	W	H	X	Y	W	H	X	Y	W	H	
1	243	108	372	372	429	190	163	124	266	190	163	124	1	1	22	22	1	1	22	22	119
2	253	106	368	368	437	187	161	122	276	187	161	122	1	1	22	22	1	1	22	22	57
3	75	276	203	203	176	321	89	67	87	321	89	67	1	1	22	22	1	1	22	22	94
4	75	276	203	203	176	321	89	67	87	321	89	67	1	1	22	22	1	1	22	22	70

Заключение

При выполнении проекта были разработаны алгоритмы анализа опасного состояния водителя, а именно сонливости и невнимательности. Они позволяют не только смягчать последствия аварий, но и помогают водителю избегать их, своевременно обращая его внимание на возникающие опасности, если надлежащая реакция с его стороны недостаточна или отсутствует. Данная система способна самостоятельно анализировать состояние водителя, распознавать и оценивать опасности и подавать сигналы для предотвращения ДТП.

Публикации

1. *Smirnov A.V., Kashevnik A.M., Shilov N.G., Lashkov I.B.* Driver assistant in automotive socio-cyberphysical system: reference model and case study // International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. Porto, 2016. P. 104–111.
2. *Lashkov I.B., Smirnov A.V., Kashevnik A.M., Baraniuc O.A., Parfenov V.G.* Smartphone-based identification of dangerous driving situations: algorithms and implementation // Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association and Seminar on Information Security and Protection of Information Technology (FRUCT-ISPIT). Saint-Petersburg, 2016. P. 306–313.

3. *Lashkov I.B.* Smart mobile driver assistance for Android // Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association and Seminar on Information Security and Protection of Information Technology (FRUCT-ISPIT). Saint-Petersburg, 2016. P. 543–544.
4. *Lashkov I.B., Smirnov A.V., Kashevnik A.M.* Human-smartphone interaction for dangerous situation detection and recommendation generation while driving// Speech and Computer: 18th International Conference SPECOM 2016. Proceedings. Budapest, 2016. Vol. 9811. P. 346–353.

Литература

1. *Knipling R.* PERCLOS: A valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance [Electronic resource] // Techbrief. No FHWA-MCRT-98-006. 1998. URL: <https://permanent.access.gpo.gov/gpo6571/tb98-006.pdf> (accessed: 10.04.17).
2. Two-second rule [Electronic resource] // Wikipedia [Official website]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Two-second_rule (accessed: 10.04.17).
3. *Lashkov I.B. et al.* Ontology-based approach and implementation of ADAS system for mobile device use while driving // Knowledge Engineering and Semantic Web: 6th International Conference, KESW 2015, Proceedings. Moscow, 2015. Vol. 518. P. 117–131.
4. *Viola P., Jones M.* Robust real-time object detection // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 57. No 2. P. 137–154.
5. *Freund Y. et al.* A short introduction to boosting // Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence. 1999. Vol. 14. No 5. P. 771–780.



Мелихов Иван Федорович
Факультет естественнонаучный
Кафедра высшей математики
E-mail: ivan.melikhov@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕВИТАЦИИ ДИСКА В БЛИЖНЕМ АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

И.Ф. Мелихов

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

Введение

В последние десятилетия активно развиваются технологии акустической левитации – устойчивого положения весомого объекта в акустическом поле. Можно выделить два типа акустической левитации. Первый обычно относится к манипулированию малоразмерными объектами (такими как капли), помещенными между акустическим источником и отражателем. Второй тип проявляется при работе с объектами большего размера и характеризуется высотой левитации, много меньшей длины акустической волны. Как правило, для таких процессов используют ультразвуковые источники, поэтому это явление получило название ультразвуковой левитации в ближнем акустическом поле (*ultrasonic near-field levitation*).

Описанный выше второй вид левитации применяется в промышленности при построении бесконтактных транспортировочных систем для продуктов, к качеству

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

поверхности которых предъявляются высокие требования, например кремниевых пластин, используемых для производства микроэлектроники, в частности микропроцессоров. Впервые явление ультразвуковой левитации в ближнем акустическом поле было обнаружено в 1964 году [1]. В последующие годы появилось значительное число экспериментальных и теоретических работ на эту тему. В том числе, было предложено несколько практических реализаций транспортных систем на основе ультразвуковой левитации. Так, транспортировка, основанная на использовании упругих волн, бегущих по поверхности вибрирующей подложки-направляющей, была изучена в работе [2]. Другой подход предложен в статье [3], где вместо вибрирующих направляющих рассматривается корзина с смонтированным ультразвуковым источником.

Теория акустического давления в невязкой среде была впервые описана Лордом Рэлеем в начале XX века. В несколько модифицированном виде она применялась для расчета подъемной силы в работе [2]. Однако при высоте левитации, сопоставимой с толщиной акустического пограничного слоя в среде (примерно 15–20 мкм для воздуха), необходимо учитывать вязкие эффекты. Широкое распространение получил подход моделирования чисто вязкого течения воздуха, без учета инерциальных (акустических) эффектов. Этот метод использовался в работе [3].

Цель проекта – разработка и анализ математической модели ультразвуковой левитации в ближнем акустическом поле, которая одновременно учитывает как акустические, так и вязкие эффекты в среде и позволяет рассчитать подъемную силу.

Разрабатываемая модель обладает преимуществом перед описанными выше чисто акустической и чисто вязкой моделями: она может применяться при любой высоте левитации. При этом модель является более эффективной с точки зрения вычислений по сравнению с подходами, использующими прямые численные методы.

Задачами данной работы являются:

- получение упрощенных уравнений динамики среды (воздуха) в зазоре;
- разработка неотражающих граничных условий на внешней границе расчетной области;
- численное решение полученных уравнений;
- анализ результатов моделирования и их сравнение с опубликованными экспериментальными данными.

Постановка задачи

Рассмотрим плоский акустический источник с амплитудой вибрации a и угловой частотой ω и жесткий диск радиуса R , левитирующий над источником (рис. 1).

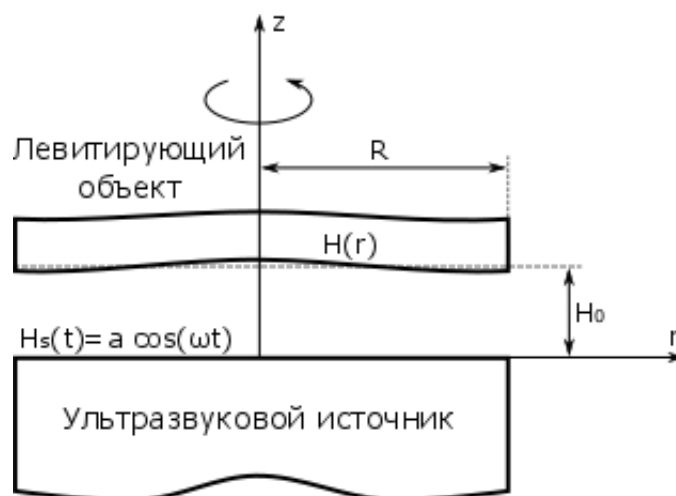


Рис. 1. Левитация жесткого диска

Исходной точкой для разработки теории являются известные уравнения динамики газа (которые могут быть найдены, например, в книге [4]). Первыми из них запишем уравнения Навье – Стокса для сжимаемого газа:

$$\rho(\partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}) = \nabla \cdot (-p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}), \quad (1a)$$

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1б)$$

где ρ – плотность воздуха, $\mathbf{v}=(u,v)$ – вектор скоростей, p – давление, \mathbf{I} – единичный тензор, $\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений, определяемый как:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] + (\mu^b - 2\mu/3)(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I}, \quad (2)$$

где μ – вязкость воздуха, μ^b – вторая вязкость воздуха.

К уравнениям динамики необходимо добавить уравнение энергии:

$$\rho T(\partial_t s + \mathbf{v} \cdot \nabla s) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \Phi, \quad (3)$$

где T – температура, s – энтропия газа, κ – теплопроводность, а диссипация вязкой энергии описывается слагаемым Φ :

$$\Phi = \tau_{ik} \partial_k v_i. \quad (4)$$

В дополнение к этому будем учитывать зависимость вязкости от температуры по закону Сьюзерленда:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + C}{T + C}, \quad (5)$$

где μ_0 , T_0 , C – эмпирические константы.

Также будем считать, что давление, плотность и температура связаны друг с другом законом идеального газа:

$$p = \rho T \mathcal{R} / \mathcal{M}, \quad (6)$$

где \mathcal{R} – универсальная газовая постоянная, \mathcal{M} – молярный объем газа.

Подъемная сила, действующая на объект, может быть вычислена как интеграл по поверхности диска от вертикальной составляющей тензора напряжений:

$$F = \iint (p - \tau_{zz}) dS. \quad (7)$$

Построение модели

Упрощенные уравнения динамики газа получаются из представленных выше исходных уравнений в несколько шагов следующим образом.

Анализ размерностей. Введем новые безразмерные величины:

$$\begin{aligned} \tilde{r} &= \frac{r}{R}, & \tilde{z} &= \frac{z}{H_0}, & \tilde{t} &= \omega t, & \tilde{u} &= \frac{u}{\omega R}, & \tilde{v} &= \frac{v}{\omega H_0}, \\ \tilde{p} &= \frac{p}{p_0}, & \tilde{\rho} &= \frac{\rho}{\rho_0}, & \tilde{\mu} &= \frac{\mu}{\mu_0}, & \tilde{s} &= \frac{s}{c_v}, & \tilde{T} &= \frac{T}{T_0}, \end{aligned}$$

где c_v – удельная теплоемкость при постоянном давлении, а p_0 , ρ_0 , μ_0 , T_0 – давление, плотность, вязкость и температура воздуха при нормальных условиях. В дальнейшем для удобства будем опускать знак тильды над безразмерными величинами.

Построение теории основано на следующих предположениях:

- толщина зазора много меньше длины акустической волны;
- толщина зазора много меньше его длины;
- амплитуда вибрации много меньше толщины зазора.

С учетом этих допущений исходные уравнения существенно упрощаются. В частности, оказывается, что уравнение энергии (3) сводится к условию адиабатичности процесса:

$$\rho = p^{1/\gamma}. \quad (8)$$

Затем, используя закон идеального газа (6) и зависимость вязкости от температуры (5), можно выразить вязкость через давление, а из уравнения динамики (1а) оказывается, что можно пренебречь изменением давления (а также плотности и вязкости) через толщину.

Для упрощения модели также оказывается удобным осреднение по толщине уравнения неразрывности (1б). Выражение для подъемной силы (7) тоже упрощается: под интегралом остается только давление.

Асимптотический анализ. Для дальнейшего построения модели требуется ввести малый параметр $\varepsilon = a/H_0$ – отношение амплитуды вибрации к средней толщине зазора. Далее решение уравнений ищется в виде ряда по этому параметру. Новые уравнения обладают тем преимуществом, что их можно решать последовательно, а в каждом приближении уравнения являются линейными.

Периодические решения. Изначально мы ограничились рассмотрением установившегося процесса левитации, то есть когда левитирующий объект неподвижен. В этом случае нас будут интересовать лишь стационарные решения полученных уравнений.

Однако из-за того, что единственной возбуждающей силой являются колебания источника, которые гармоничны по времени, в первом приближении существуют только решения также гармонические по времени.

Периодические по времени решения естественно искать в виде ряда Фурье с базовой частотой, равной частоте вибрации источника (в безразмерных величинах она равна единице). В первом приближении ненулевыми являются лишь слагаемые с номерами ± 1 . Однако средняя по периоду подъемная сила в первом приближении равна нулю. Это означает, что для описания интересующего нас эффекта необходимо проанализировать уравнения второго порядка малости по ε . В них нелинейные эффекты будут учтены за счет слагаемых, в которые входят произведения величин первого порядка малости.

Граничные условия. Самым простым граничным условием на давление на конце зазора является приравнение его к атмосферному значению. Однако такое условие порождает отражение исходящей акустической волны внутрь зазора, в то время как в реальности она распространяется во внешнюю среду. Поэтому необходимо разработать специальные неотражающие граничные условия.

Упрощенные уравнения

После выполнения описанных выше шагов удастся получить упрощенные уравнения для описания течения воздуха в осесимметричном зазоре между акустическим источником и левитирующим диском.

В первом приближении уравнение неразрывности вместе с граничными условиями имеют вид:

$$\begin{aligned} i \frac{p_1}{\gamma} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{u}_1) &= \frac{i}{2}, \\ \partial_r p_1|_{r=1} &= iKp_1. \end{aligned} \quad (9)$$

Уравнение неразрывности (9) должно решаться совместно с уравнением на радиальную скорость:

$$\begin{aligned} i\gamma K^2 u_1 &= -\frac{\partial p_1}{\partial r} + \Sigma \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2}, \\ u_1|_{z=0} &= u_1|_{z=1} = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\bar{u}_1 = \int_0^1 u_1 dz.$$

Здесь i – мнимая единица, γ – показатель адиабаты газа, а безразмерное акустическое волновое число K и «число сжатости» Σ определяются равенствами:

$$K = \left(\frac{\omega^2 R^2 \rho^2}{\gamma p_0} \right)^{1/2}, \quad \Sigma = \frac{\mu \omega R^2}{p_0 H_0^2}.$$

Решив уравнения (9, 10), из уравнения неразрывности (1б) можно найти поперечную скорость:

$$v_1 = \frac{i}{2} - \int_0^z \left(\frac{i}{\gamma} p_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_1) \right) dz'. \quad (11)$$

Во втором порядке достаточно рассмотреть только нулевую гармонику, отвечающую осредненным по времени величинам. Уравнение неразрывности принимает вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \left\{ \bar{u}_2 + \left[\left(\frac{p_1}{\gamma} - 1/2 \right) \bar{u}_1 \right]_0 \right\} \right) = 0, \quad (12)$$

$$p_2|_{r=1} = 0.$$

Так же, как и в первом приближении, оно должно решаться совместно с уравнением на радиальную скорость:

$$i\gamma K^2 \left(\frac{i}{\gamma} (p_1 u_1^* - p_1^* u_1) + \left[u_1 \frac{\partial u_1}{\partial r} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \right]_0 \right) = -\frac{\partial p_2}{\partial r} + \Sigma \frac{\partial^2}{\partial z^2} (u_2 + M[p_1 u_1]_0),$$

$$u_1|_{z=0} = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} [u_1 + u_1^*]_0, \quad u_2|_{z=1} = 0, \quad (13)$$

$$\bar{u}_2 = \int_0^1 u_2 dz - (\bar{u}_1 + \bar{u}_1^*)/2.$$

Здесь $[a_1 b_1]_0 = a_1 b_1^* + a_1^* b_1$, где * означает комплексное сопряжение, а число M равно:

$$M = \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{T_0 + 3C}{T_0 + C}. \quad (14)$$

Численное решение уравнений

Полученные уравнения решаются численно методом конечных элементов. Важные особенности уравнений: во-первых, они стационарные, а во-вторых, линейные. В сравнении с прямым численным счетом, упомянутом во введении, это позволяет получать решение за очень короткое время.

В случае осесимметричной задачи с плоским диском расчетная область представляется прямоугольником. Вычислительная схема состоит из двух последовательных шагов. На первом шаге решаются уравнения первого порядка (9–11). Затем полученное решение подставляется в уравнения второго порядка (12, 13), которые решаются относительно величин p_2, u_2 .

Результаты

Из формы полученных уравнений видно, что существуют два механизма левитации: инерциальный (акустический) и вязкий. Их интенсивность выражается акустическим волновым числом K и числом сжатости Σ . Отношение безразмерных величин γK^2 и Σ пропорционально квадрату отношения толщины зазора к толщине акустического

пограничного слоя. При частоте вибраций 20 кГц толщина акустического пограничного слоя в воздухе составляет примерно 15 мкм. Когда зазор достаточно велик, доминируют инерциальные эффекты; в противном случае, когда зазор меньше пограничного слоя, важны только вязкие эффекты. Однако для промежуточных режимов оба эффекта проявляются в равной степени. Построенная модель позволяет их учесть.

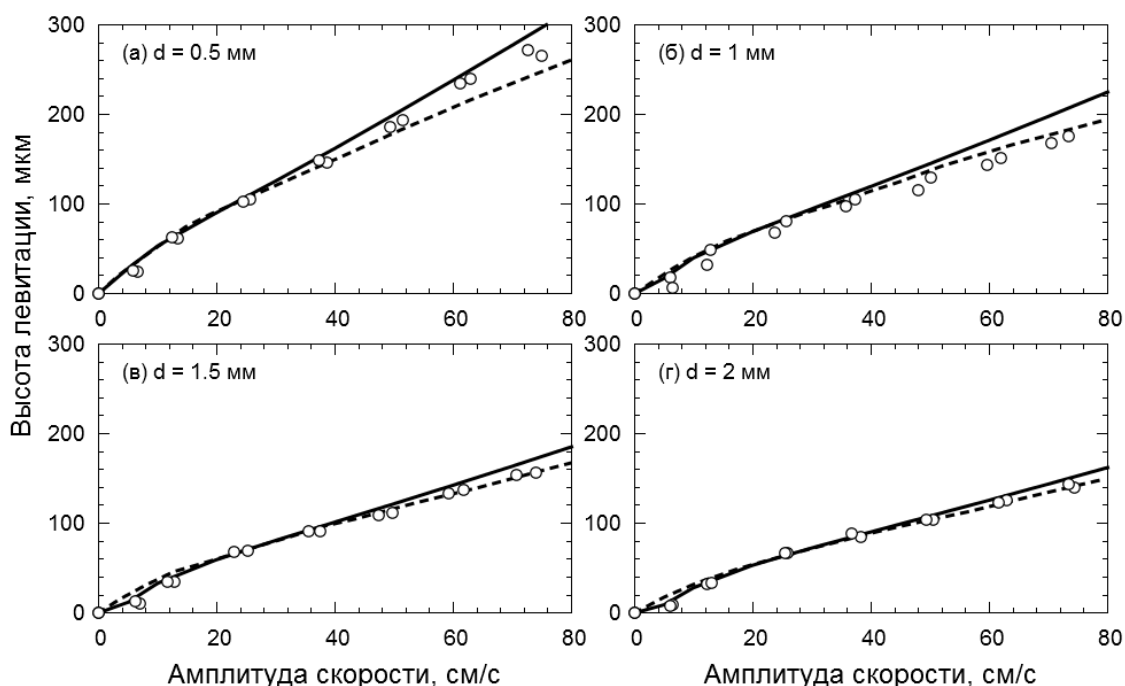


Рис. 2. Зависимость высоты левитации от амплитуды скорости вибрации ультразвукового источника. Радиус диска 20 мм, толщина – $d = 0,5–2$ мм, частота вибрации 19,5 кГц

На рис. 2 приведено сравнение результатов, полученных с помощью разработанной математической модели (сплошные линии), с прямым численным решением исходных уравнений (пунктир) и экспериментальными данными из работы [5] (точки). Видно, что построенная модель хорошо совпадает с экспериментом и прямыми расчетами. При этом предложенный подход требует решения пяти линейных независимых от времени дифференциальных уравнений. Это делает его намного эффективнее прямого решения исходных нелинейных уравнений с зависимостью от времени.

Заключение

В ходе работы была построена и проанализирована математическая модель ультразвуковой левитации объекта в ближнем акустическом поле. По сравнению с существующими подходами, предлагаемая модель естественным образом покрывает и акустический режим левитации (при больших высотах, порядка 50–400 мкм), и вязкий (при малых высотах, порядка 5–20 мкм). В дополнение она также описывает и переходные режимы, когда акустические и вязкие эффекты соизмеримы друг с другом. Это достигается за счет учета большого количества физических эффектов, участвующих в процессе левитации: инерции, вязкости, сжимаемости газа, зависимости вязкости от температуры, деформации левитирующего объекта и скачка давления на краю зазора.

Результаты работы находятся в соответствии с опубликованными данными, полученными экспериментальным образом и с помощью метода прямого численного счета. Они могут быть использованы для расчета подъемной силы при проектировании более совершенных транспортных систем на основе акустической левитации. При этом разработанный подход остается более эффективным в вычислительном плане.

Публикации

Melikhov I., Chivilikhin S., Amosov A., Jeanson R. Viscoacoustic model for near-field ultrasonic levitation // *Physical Review E*. 2016. Vol. 94. No 5. P. 053103.

Литература

1. Salbu E. Compressible squeeze films and squeeze bearings // *Journal of Basic Engineering*. 1964. Vol. 86. No 2. P. 355–364.
2. Hashimoto Y. et al. Transporting objects without contact using flexural traveling waves // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103. No 6. P. 3230–3233.
3. Yoshimoto S. et al. Float characteristics of a squeeze-film air bearing for a linear motion guide using ultrasonic vibration // *Tribology International*. 2007. Vol. 40. No 3. P. 503–511.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. 4-е изд. М., 1988. Т. 6. – 736 с.
5. Nomura H. et al. Theoretical and experimental examination of near-field acoustic levitation // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111. No 4. P. 1578–1583.



Мелихова Алина Семеновна
Факультет естественнонаучный
Кафедра высшей математики
E-mail: alina.s.melikhova@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ЦЕПОЧЕЧНЫХ НАНОСТРУКТУР: ЦЕПОЧКА ТИПА «ЗИГЗАГ»

А.С. Мелихова

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

Введение

На сегодняшний день трудно представить себе отрасль науки, которую бы не затронули нанотехнологии. Появляются совершенно новые по своей структуре, свойствам, области применения и идеологии системы и материалы. В частности, цепочечные структуры, о которых пойдет речь в данной работе, построенные из микро- или нано-резонаторов часто используются в оптических системах (например, *SCISSOR* [1], оптическая волноводная система [2], оптическая линия задержки [3]), наноэлектронике (наностручок и подобные системы [4–8]) и молекулярной биологии (фотонный биосенсор [9]).

Одним из важнейших этапов проектирования реальных физических систем является построение и анализ соответствующей математической модели. Ведь имея модель, можно сконструировать систему с требуемыми практиками и предсказанными теоретиками свойствами при существенно меньших затратах усилий и средств. Помимо чисто практического интереса, в процессе исследования порой возникают вопросы и фундаментального характера. Например, с математической точки зрения большой интерес вызывают так называемые явно решаемые модели.

Настоящая работа посвящена изучению спектра стационарного уравнения Шредингера в системе типа зигзагообразной цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов.

Модельный гамильтониан описывается в рамках теории расширений симметрических операторов [10, 11]. В нашей модели резонаторы предполагаются слабо связанными, то есть применяется подход, известный как модель точечного окна (щели нулевой ширины), описанный в [12–15].

Основная цель работы – исследование возможности контролирования спектральных свойств системы с помощью манипулирования геометрическими (углом зигзага) и физическими (интенсивностью соединения) параметрами системы.

Постановка задачи и построение модели

В работе рассматривается система, представляющая собой зигзагообразную цепочку слабо связанных идентичных шарообразных резонаторов (рис. 1). С геометрической точки зрения такую систему можно описать следующим образом:

- система состоит из бесконечного количества идентичных шарообразных резонаторов (их удобно пронумеровать: $j \in \mathbb{Z}_- \cup \{0\} \cup \mathbb{Z}_+$). Не умаляя общности, будем считать, что все шары имеют единичный радиус;
- любые два соседних резонатора (под номерами $j - 1$ и j) имеют только одну общую точку (\mathbf{x}_j). Все точки сочленения резонаторов лежат на одной прямой;
- угол (меньший), образуемый радиус-векторами, проведенными из центра шара номер j к точкам \mathbf{x}_j и \mathbf{x}_{j+1} , обозначим как ω , где $\omega \in (\pi/3; \pi]$;
- в роли элементарной ячейки цепочки могут быть взяты любые два соседних соединенных резонатора.

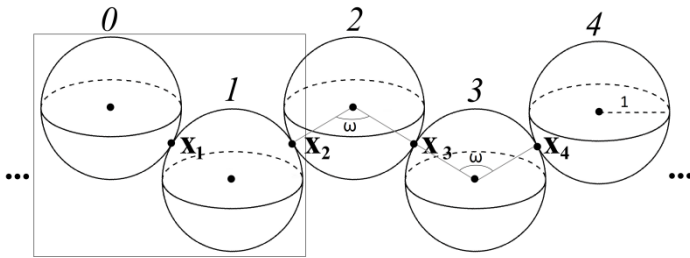


Рис. 1. Геометрия системы

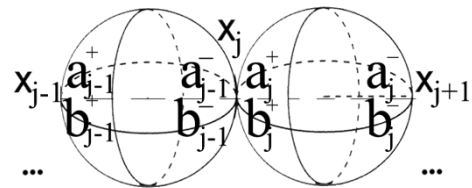


Рис. 2. Схема соответствия коэффициентов асимптотики точкам сочленения резонаторов

Математическую модель, описывающую состояние нерелятивистской бесспиновой частицы, помещенной в указанную цепочку при отсутствии внешних полей, будем строить на основе теории самосопряженных расширений симметрических операторов.

Опишем гамильтониан для данной системы. Выберем систему измерений таким образом, чтобы исходный оператор мог быть представлен в виде ортогональной суммы неймановских Лапласианов: $\hat{H} = -\Delta = - \bigoplus_{j=-\infty}^{\infty} \Delta_j$, где $-\Delta_j \in L_2(\Omega_j)$. Далее сузим оператор $-\Delta$ на множество всех гладких функций из области определения $D(-\Delta)$, которые обращаются в нуль в точках соединения резонаторов \mathbf{x}_j . Это сужение $-\Delta_0$ исходного оператора является симметрическим оператором с индексами дефекта (∞, ∞) , а роль дефектных элементов играют функции Грина $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda)$. Область определения $D(-\Delta_0^*)$ сопряженного оператора представима в следующем виде:

$$D(-\Delta_0^*) = D(-\Delta_0^F) \dot{+} N_{\lambda_0},$$

где $D(-\Delta_0^F)$ – расширение по Фридрихсу оператора $-\Delta_0$, а N_{λ_0} – дефектное подпространство, соответствующее регулярному значению λ_0 [16].

В случае когда у нас есть только два резонатора, соединенных в точке \mathbf{x}_0 , функция f из $D(-\Delta_0^*)$ принимает следующий вид:

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1^0 + a_1^- G_1(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \lambda_0) + b_1^- \\ f_2^0 + a_2^+ G_2(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0, \lambda_0) + b_2^- \end{pmatrix},$$

где $f_i^0 \in D(-\Delta_0)$ ($i = 1, 2$), а a_1^- , a_2^+ , b_1^- , b_2^- – некоторые коэффициенты. В случае же бесконечной цепочки функция из области определения сопряженного оператора описывается аналогичным образом, а соответствие коэффициентов a_j^\pm и b_j^\pm точкам сочленения резонаторов \mathbf{x}_j представлено на рис. 2. Самосопряженное расширение $-\Delta^*$ нашего симметрического оператора с учетом наличия условия δ -соединения с константой связи α можно получить, выбрав следующее соотношение между коэффициентами a_j^\pm , b_j^\pm :

$$\begin{cases} a_j^+ & = -a_{j-1}^-, \\ b_j^+ - b_{j-1}^- & = -\alpha a_{j-1}^-. \end{cases} \quad (1)$$

Спектральный анализ системы

Проведем спектральный анализ системы, используя метод трансфер-матриц. Трансфер-матрица, выражающая в данном случае связь коэффициентов a_j^\pm с a_{j-1}^\pm , позволяет транслировать решение с одной ячейки цепочки на другую. Более того, известно, что существует следующая взаимосвязь между собственными числами трансфер-матрицы и асимптотическим поведением нормы вектора $\|(a_j^+, a_j^-)^T\|$: собственное число трансфер-матрицы по модулю меньше единицы дает условие для определения принадлежности значения энергии к точечному спектру, а равное по модулю единице позволяет найти непрерывный спектр.

Дискретный спектр цепочки рассматриваемой конфигурации пуст.

Этот факт нетрудно доказать с помощью уравнения: $\begin{vmatrix} a_1^+ & a_{-1}^+ \\ a_1^- & a_{-1}^- \end{vmatrix} = 0$. Оно не имеет решений, удовлетворяющих условиям принадлежности к дискретному спектру.

Опишем структуру непрерывного спектра. Матрица \mathbf{M} перехода из одной элементарной ячейки цепочки в соседнюю может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} -1 & -\frac{2g - \alpha}{G_\omega} \\ \frac{2g - \alpha}{G_\omega} & \left(\frac{2g - \alpha}{G_\omega}\right)^2 - 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $g = \lim_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_j} (G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda) - G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j, \lambda_0))$, $G_\omega = G(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_{j+1}, \lambda)$. Следовательно, используя спектральные свойства трансфер-матрицы (2), получаем выражение для описания спектра рассматриваемой системы (оно соответствует равенству модуля собственного числа матрицы монодромии – единице):

$$\left| \frac{2g - \alpha}{G_\omega} \right| \leq 2. \quad (3)$$

А значит, уравнение, описывающее границы непрерывного спектра, имеет вид:

$$g \pm G_\omega = \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что функция g содержит параметр λ_0 , отвечающий за выбор расширения и связанный с геометрией отверстия; функция G_ω содержит параметр ω – угол зигзага и, наконец, параметр α соотносится с интенсивностью потенциалов в точках

сочленения резонаторов. Таким образом, варьируя эти параметры, мы можем контролировать спектр рассматриваемой системы (влиять на ширину разрешенных/запрещенных зон).

Результаты

Резюмируя все выше сказанное, сформулируем следующую теорему.

Теорема. Спектр гамильтониана, описывающего поведение нерелятивистской бесспиновой частицы в зигзагообразной цепочке слабосвязанных шарообразных резонаторов в отсутствии внешних полей, состоит из собственных значений бесконечной кратности, собственных значений неймановского лапласиана в шаре, соответствующих собственным функциям, убывающим до 0 в обеих точках сочленения резонаторов (\mathbf{x}_{j-1} и \mathbf{x}_j), а также непрерывного спектра, имеющего зонную структуру и полностью описываемого неравенством (3). Дискретный спектр исследуемого гамильтониана пуст.

Приведем результаты численного моделирования, выполненного в пакете *Wolfram Mathematica 10*. На рис. 3 представлены несколько первых зон непрерывного спектра при заданном угле зигзага. Видно, что в зависимости от интенсивности потенциалов, расположенных в точках соединения резонаторов, меняется ширина зон, а при некоторых значениях α зоны расщепляются.

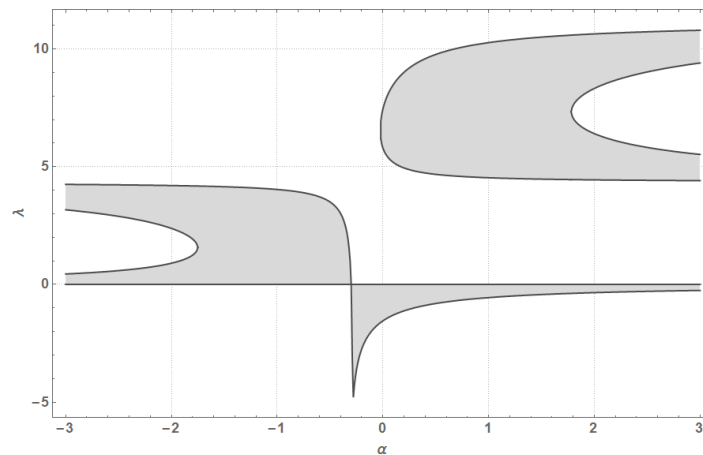


Рис. 3. Зонная структура непрерывного спектра в зависимости от α ($\omega = 5\pi/6$)

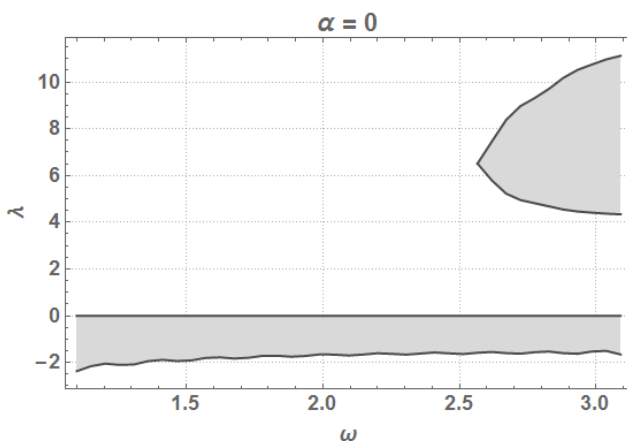


Рис. 4. Зонная структура непрерывного спектра в зависимости от угла ω при свободном движении частицы ($\alpha = 0$)

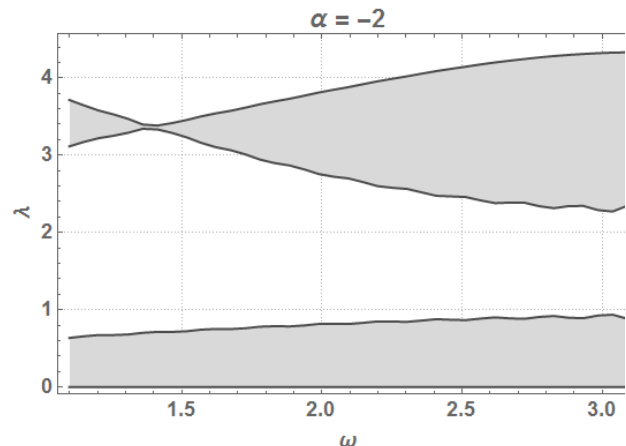


Рис. 5. Зонная структура непрерывного спектра в зависимости от угла ω при наличии δ -потенциалов в точках сочленения резонаторов ($\alpha = -2$)

На рис. 4 и 5 изображены графики зависимости первых двух зон непрерывного спектра от угла зигзага при различных значениях интенсивности соединения α . Отметим, что изменение угла зигзага также влияет на ширину спектральной зоны, а при некоторых α – и на ее наличие.

Публикации

1. *Аникевич А.С.* Спектральная задача для цепочек слабо связанных шарообразных резонаторов // Наносистемы: физика, химия, математика. СПб., 2012. Т. 3. № 3. С. 23–30.
2. *Аникевич А.С.* Спектральная задача для цепочек слабо связанных шарообразных резонаторов // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров НИУ ИТМО. СПб., 2012. С. 13–15.
3. *Аникевич А.С.* Спектральная задача для цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов с Y-разветвлением. Случай дельтаобразного соединения // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 24–26.
4. *Anikevich A.S.* Negative eigenvalues of the Y-type chain of weakly coupled ball resonators // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2013. Vol. 4. No 4. P. 545–549.
5. *Мелихова А.С.* О спектре цепочек слабо связанных шарообразных резонаторов // Труды студенческого центра прикладных математических исследований. СПб., 2013. Т. 3. С. 70–79.
6. *Melikhova A.S., Popov I.Y.* Bent and branched chains of nanoresonators // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 541. P. 012061.
7. *Melikhova A.S.* Estimates for numbers of negative eigenvalues of Laplacian for Y-type weakly coupled chain of ball resonators // Mathematical Results in Quantum Mechanics: Proceedings of the QMath12 Conference. – 2014. P. 325–330.
8. *Melikhova A.S.* A remark on the scattering by orifice // Труды студенческой центра прикладных математических исследований. СПб., 2015. Т. 5. С. 86–90.
9. *Мелихова А.С.* Спектральная задача для цепочки слабо связанных шарообразных резонатора с изломом при условии дельта-соединения элементов цепочки // Труды студенческой центра прикладных математических исследований. СПб., 2015. Т. 5. С. 77–85.
10. *Melikhova A.S., Popov I.Y.* Spectral problem for solvable model of bent nano peapod // Applicable Analysis. 2017. Vol. 96. No 2. P. 215–224.
11. *Blinova I.V., Melikhova A.S., Popov I.Y.* Periodic chain of resonators: gap control and geometry of the system // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. P. 012062.

Литература

1. *Heebner J.E. et al.* SCISSOR solitons and other novel propagation effects in microresonator-modified waveguides // Journal of the Optical Society of America B. 2002. Vol. 19. No 4. P. 722–731.
2. *Popov I.Y. et al.* Coupled dielectric waveguides with photonic crystal properties // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2010. Vol. 50. No 11. P. 1830–1836.
3. *Lenz G. et al.* Optical delay lines based on optical filters // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2001. Vol. 37. No 4. P. 525–532.
4. *Wang Y. et al.* Designed functional systems from peapod-like Co@Carbon to Co₃O₄@Carbon nanocomposites // ACS Nano. 2010. Vol. 4. No 8. P. 4753–4761.
5. *Yang Y. et al.* Plasmon absorption of Au-in-CoAl₂O₄ linear nanopeapod chains // The Journal of Physical Chemistry C. 2013. Vol. 117. No 27. P. 14142–14148.
6. *Enyashin A.N., Ivanovskii A.L.* Nanotubular composites: modeling of capillary filling of nanotubes of disulfide of molybdenum by molecules of TiCl₄ // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2010. Vol. 1. No 1. P. 63–71.
7. *Krivanek O.L. et al.* Gentle STEM: ADF imaging and EELS at low primary energies // Ultramicroscopy. 2010. Vol. 110. No 8. P. 935–945.
8. *Abou-Hamad E. et al.* Hydrogenation of C₆₀ in peapods: physical chemistry in nano vessels //

The Journal of Physical Chemistry C. 2009. Vol. 113. No 20. P. 8583–8587.

9. Boyd R.W., Heebner J.E. Sensitive disk-resonator photonic biosensor // Applied Optics. 2001. Vol. 40. No 31. P. 5742–5747.

10. Альбеверио С. и др. Решаемые модели в квантовой механике. М., 1991. – 568 с.

11. Pavlov B.S. Extension theory and explicitly solvable models // Uspekhi Matematicheskikh Nauk. 1987. Vol. 42. No 6. P. 99–131.

12. Popov I.Y. The resonator with narrow slit and the model based on the operator extensions theory // Journal of Mathematical Physics. 1992. Vol. 33. No 11. P. 3794–3801.

13. Popov I.Y. Operator extensions theory model for electromagnetic field-electron interaction // Journal of Mathematical Physics. 2012. Vol. 53. No 6. P. 063505.

14. Popov I.Y. Extensions theory and localization of resonances for domains of trap type // Mat. Sbornik. 1990. Vol. 181. No 10. P. 1366–1390.

15. Popov I.Y. Model of point-like window for electromagnetic Helmholtz resonator // Zeitschrift Anal Anwend. 2013. Vol. 32. P. 155–162.

16. Бирман М.Ш., Соломяк М.З. Спектральная теория самосопряженных операторов в гильбертовом пространстве. СПб., 2010. – 464 с.



Мельник Максим Владимирович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: mmelnik@corp.ifmo.ru

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ЗАВИСИМОСТЕЙ ВРЕМЕНИ КОГЕРЕНТНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ
СУПЕРКОНТИНУУМОВ ОТ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ
ИСХОДНОГО ИМПУЛЬСА**

М.В. Мельник

Научный руководитель – ассистент А.Н. Цыпкин

Основная цель работы – теоретический и экспериментальный анализ закономерностей зависимостей времени когерентности спектральных суперконтинуумов от центральной длины волны исходного импульса.

В ходе работы было проведено исследование спектральных суперконтинуумов, генерируемых в различных оптических средах. Выявлено, что при увеличении центральной длины волны фемтосекундного лазерного импульса на входе время когерентности генерируемого спектрального суперконтинуума уменьшается, однако в области нулевой дисперсии оптической среды существует «скачок» увеличения времени когерентности. При увеличении интенсивности импульса на входе время когерентности суперконтинуума уменьшается. Показано, что время когерентности импульса на выходе из нелинейной среды имеет обратную зависимость от коэффициента фазовой модуляции генерируемого суперконтинуума. Были проведены экспериментальные исследования, результаты которых повторяют закономерности, полученные теоретически. Построена экспериментальная

зависимость времени когерентности от центральной длины волны импульса на входе в среду.

При численном моделировании генерации спектрального суперконтинуума для описания распространения интенсивного светового импульса в волноведущей диэлектрической среде с нормальной групповой дисперсией и нерезонансной нелинейностью используется следующее уравнение [1, 2]:

$$\frac{\partial E}{\partial z} - a \frac{\partial^3 E}{\partial \tau^3} + b \int_{-\infty}^{\tau} E d\tau' + g E^2 \frac{\partial E}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

где E – электрическое поле светового импульса; z – пространственная координата, вдоль которой распространяется импульс; $\tau = t - \frac{N_0}{c} z$ – время в движущейся с импульсом системе координат, t – время, c – скорость света в вакууме, параметры N_0 , a и b описывают линейный показатель преломления среды и его дисперсию:

$$n(\omega) = N_0 + a c \omega^2 - c \frac{b}{\omega^2}, \quad (2)$$

параметр g характеризует безынерционную кубическую по полю нелинейность поляризационного отклика среды.

Для расчета зависимости интерференционного сигнала от временной задержки было проведено моделирование распространения предельно коротких импульсов по уравнению (1) в трех различных оптических средах. Параметры для плавленого кварца приведены в работе [3], микроструктурированного волокна в работе [4] и для полого волновода, заполненного аргоном, в [5]. Метод расчета времени когерентности спектрального суперконтинуума и его зависимости от параметров среды и импульса на входе приведены в работе [6].

На рис. 1 продемонстрированы зависимости времени когерентности спектрального суперконтинуума генерируемого в плавленом кварце, кварцевом микроструктурированном волокне и полом волновода, заполненном аргоном, от длины волны импульса на входе в среду для длительностей (а) $\tau_p = 10$ фс, (б) $\tau_p = 80$ фс и пиковых интенсивностей $I = 10^{13}$ Вт/см² и $I = 10^{12}$ Вт/см² (5×10^{12} Вт/см² в случае микроструктурированного волокна и полого волновода, заполненного аргоном).

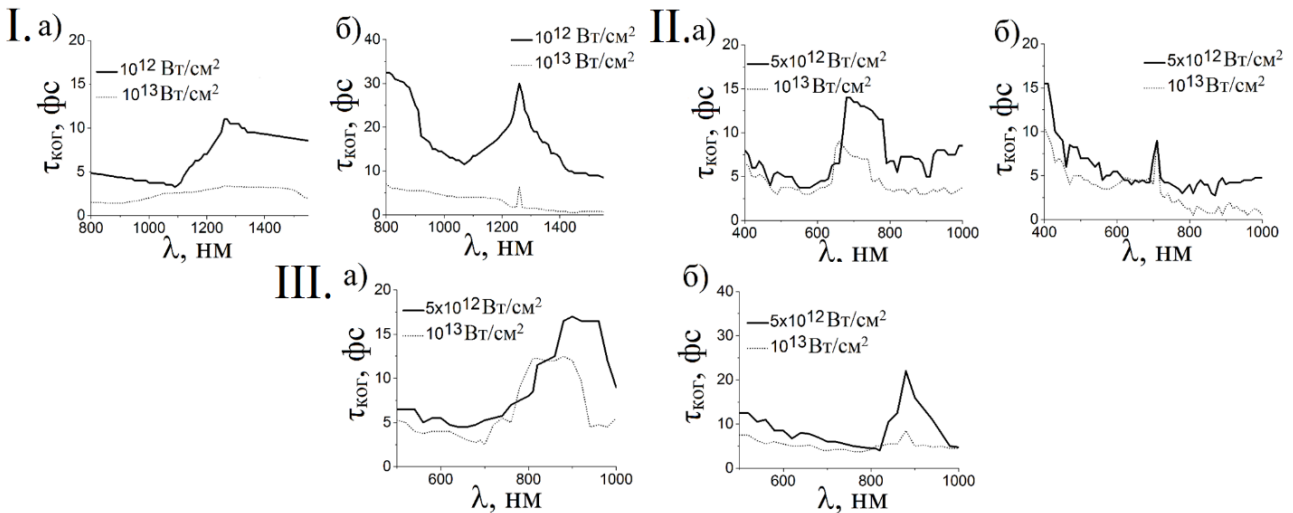


Рис. 1. Зависимость времени когерентности $\tau_{\text{ког}}$ спектрального суперконтинуума на выходе из (I) плавленого кварца длиной 10 мм, (II) микроструктурированного кварцевого волокна длиной 10 мм, (III) полого волновода, заполненного аргоном, длиной 10 м от центральной длины волны импульса на входе

Из зависимостей, представленных выше, можно сделать несколько выводов. Во-первых, увеличение центральной длины волны импульса на входе в среду приводит к уменьшению времени когерентности, однако в области нулевой дисперсии среды

присутствует его скачкообразное увеличение. Например, для длительности импульса на входе в среду равной 80 фс и пиковой интенсивности $I = 10^{13}$ Вт/см² на длине волны 800 нм время когерентности составляет – 7 фс. С увеличением длины волны оно падает, достигая минимума в 1,75 фс на длине волны 1230 нм. В области нулевой дисперсии среды время когерентности резко возрастает до 6,5 фс, после чего вновь уменьшается, достигая минимума в 0,5 фс на длине волны 1560 нм, что отражает переход к некогерентному суперконтинууму. Следует отметить, что на рис. 1 видно, что область скачкообразного увеличения времени когерентности уширяется и постепенно исчезает при уменьшении длительности импульса на входе в среду от 80 до 10 фс. Также на рис. 1 показано, что при увеличении пиковой интенсивности время когерентности уменьшается. Так, для длительности 80 фс и пиковых интенсивностей $I = 10^{13}$ Вт/см² и $I = 10^{12}$ Вт/см² значение времени когерентности на длине волны нулевой дисперсии плавленого кварца (1260 нм) равно 30 фс и 6,5 фс соответственно.

В области нормальной дисперсии среды при увеличении центральной длины волны импульса на входе временной профиль электрического поля остается однородным, по сравнению с областью аномальной дисперсии, и, кроме того, имеет линейный чирп. Несмотря на это, время когерентности уменьшается с увеличением длины волны. Это объясняется тем, что при увеличении центральной длины волны коэффициент наклона чирпа увеличивается, как показано на рис. 2. Кроме того отчетливо видно, что зависимость коэффициента наклона чирпа обратно пропорциональна зависимости времени когерентности.

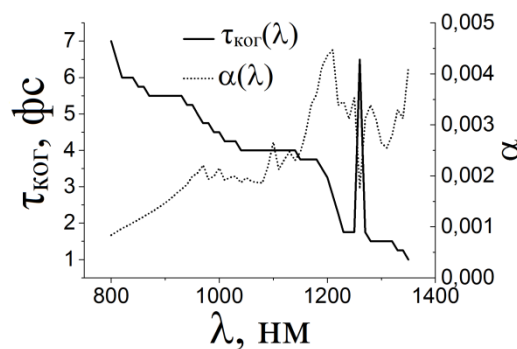


Рис. 2. Зависимость времени когерентности спектрального суперконтинуума и чирпа на выходе из плавленого кварца длиной 10 мм от центральной длины волны импульса на входе с длительностью $\tau_p = 80$ фс и пиковой интенсивностью $I = 10^{13}$ Вт/см²

Теоретический анализ уравнения (6) был проведен для подтверждения зависимости описанной выше для линейно чирпированного импульса следующего вида:

$$E(t) = E_0 \exp\left(-2 \frac{t^2}{\tau_0^2}\right) \sin\left(\omega_0 \left(1 + \frac{\alpha_0}{\tau_0} t\right) t\right). \quad (7)$$

Результат аналитического решения уравнения (6) для исходного импульса вида (7) выглядит следующим образом:

$$I(\Delta\tau) = E_0^2 \times \frac{\tau_0}{2} \sqrt{\pi} \times \left[K - \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{i\omega_0 \alpha_0 \tau_0}{2}}} \times \exp\left(\frac{4 \frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2} (i\omega_0 \alpha_0 \tau_0 - 1) - \omega_0^2 \tau_0^2 + \omega_0^2 \tau_0^2 \Delta\tau^2}{4 \left(1 - \frac{i\omega_0 \alpha_0 \tau_0}{2}\right)}\right) - \right. \right. \\ \left. \left. \exp\left(\Delta\tau^2 \tau_0^2 - \omega_0^2 \tau_0^2 \Delta\tau^2 + i\omega_0 \Delta\tau + \text{к.с.}\right) \right] \right] \quad (8)$$

где $K = 1 - \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{i\omega_0 \alpha_0 \tau_0}{2}}} \times \exp\left(\frac{-\omega_0^2 \tau_0^2}{4 \left(1 - \frac{i\omega_0 \alpha_0 \tau_0}{2}\right)}\right) + \text{к.с.}\right)$.

Легко показать, что в предельном случае, когда $\alpha_0 = 0$, уравнение (8) приводится к виду:

$$I(\Delta\tau) = E_0^2 \times \frac{\tau_0}{2} \sqrt{\pi} \times \left[1 + \exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2}\right) \times \cos(\omega_0 \Delta\tau) \right]. \quad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что $\exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2}\right)$ – это огибающая интерференционного сигнала, и тогда $\tau_0 = \tau_{\text{ког}}$, что согласуется с численными расчетами.

Основываясь на результатах численного моделирования, можно сделать следующее допущение – $\exp(-\omega_0^2 \tau_0^2) \cong 0$. Таким образом, $K \approx 1$ и членом $\exp\left(\frac{4\frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2}(i\omega_0 \alpha_0 \tau_0 - 1) - \omega_0^2 \tau_0^2 + \omega_0^2 \tau_0^2 \Delta\tau^2}{4\left(1 - \frac{i\omega_0 \alpha_0 \tau_0}{2}\right)}\right)$ можно пренебречь, что позволяет сократить уравнение (8) до вида:

$$I(\Delta\tau) = E_0^2 \times \frac{\tau_0}{2} \sqrt{\pi} \times \left[1 + \exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2} - \frac{\omega_0^2 \alpha_0^2 \Delta\tau^2}{4}\right) \times \cos(\omega_0 \Delta\tau) \right], \quad (10)$$

где $\exp\left(-\frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2} - \frac{\omega_0^2 \alpha_0^2 \Delta\tau^2}{4}\right)$ – огибающая интерференционного сигнала. Тогда член, отвечающий за время когерентности:

$$-\frac{\Delta\tau^2}{\tau_{\text{ког}}^2} = -\frac{\Delta\tau^2}{\tau_0^2} - \frac{\omega_0^2 \alpha_0^2 \Delta\tau^2}{4} \rightarrow \tau_{\text{ког}}^2 = \frac{\tau_0^2}{1 - \frac{\omega_0^2 \alpha_0^2 \tau_0^2}{4}} \rightarrow \left[\frac{\omega_0^2 \alpha_0^2 \tau_0^2}{4} \gg 1 \right] \rightarrow \tau_{\text{ког}} \sim \frac{1}{\omega_0 \alpha_0}.$$

Следовательно, время когерентности спектрального суперконтинуума обратно пропорционально коэффициенту линейной фазовой модуляции, что согласуется с результатами численных расчетов, представленными на рис. 2.

Эксперимент

Для экспериментальной реализации измерения времени когерентности спектрального суперконтинуума, генерируемого в микроструктурированном кварцевом волокне, была собрана схема интерферометра Майкельсона (рис. 3). Ее основой являлся лазер на кристаллах титан-сапфира, который излучает в диапазоне от 775 до 815 нм. Длительность оптических импульсов с центральной длиной волны 780 нм на выходе лазерной системы составляла 25 фс, ширина спектра по его полувысоте – 54 нм. Длительность импульса регистрировалась с помощью автокоррелятора *AVESTA AA10DD*. Измерения мощности проводились с помощью прибора *NOVA-2*. В качестве генератора когерентного спектрального суперконтинуума применялось оптическое микроструктурированное волокно *MC-Super*.

В результате распространения в нем лазерного импульса происходила генерация суперконтинуума. Для получения интерференционного сигнала импульс с уширенным спектром проходил через интерферометр Майкельсона и после светоделительного кубика (СД) разделялся на два взаимно перпендикулярных пучка. Первый пучок, отразившись от поверхности светоделительного куба, направлялся к опорному зеркалу (М1), отражался от него, двигался в обратном направлении и снова проходил через светоделительный куб. Второй пучок, пройдя через светоделитель, отражался от сканирующего зеркала (М2), перемещение которого с помощью микрометрической подвижки параллельно самому себе обеспечивало управление временной задержкой между импульсами. Таким образом, от одного источника суперконтинуума регистрировалось суммарное поле, и получался интерференционный сигнал на фотодетекторе от перемещения подвижки. Измерения спектра проводились с помощью спектрометра *ASP100* в диапазоне длин волн 190–1100 нм.

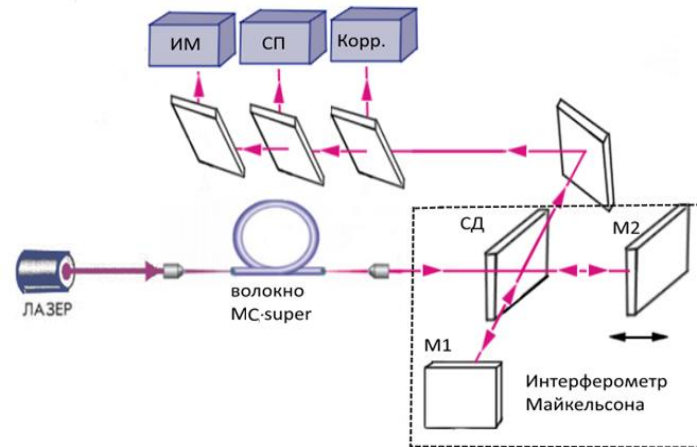


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: СД – светоделитель, M1 – опорное зеркало, M2 – сканирующее зеркало, ИМ – измеритель мощности, СП – спектрометр, Корр. – коррелятор

Спектр суперконтинуума простирался от 400 до 1000 нм, что соответствовало близости длины волны входного импульса к длине волны нулевой дисперсии. Так как с увеличением длины волны входного излучения ширина спектра суперконтинуума не изменялась, можно утверждать, что для энергии импульса примерно в 3 нДж длина волны импульса на входе находится в области нормальной дисперсии среды. Измерение времени когерентности проводилось по методу, приведенному в данной работе.

На рис. 4 представлена зависимость времени когерентности от длины волны для пяти различных длин волн (каждая точка графика соответствует своей длине волны.)

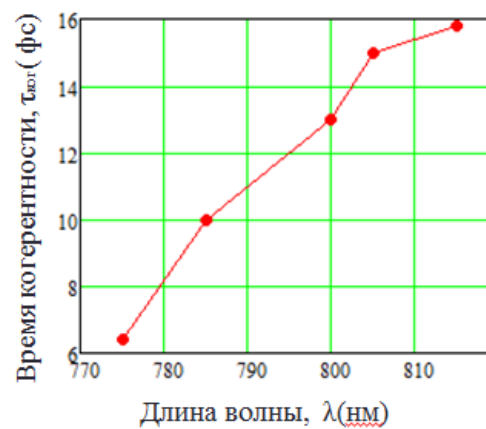


Рис. 4. Зависимость времени когерентности от центральной длины волны фемтосекундного лазерного импульса на входе при длительности исходного импульса $t = 25$ фс

По полученным результатам можно сделать вывод, что при смещении центральной длины волны в область нулевой дисперсии время когерентности спектрального суперконтинуума увеличивается. Диапазон длин волн, в котором излучает лабораторный лазер, не дает возможности проследить за дальнейшим ходом исследуемой зависимости. Однако форма приведенного графика позволяет сделать предположение, что в эксперименте было достигнуто максимальное значение времени когерентности спектрального суперконтинуума, генерируемого в кварцевом волокне *MC-Super*, и при дальнейшем увеличении центральной длины волны излучения время когерентности пойдет на спад. Полученные результаты согласуются с закономерностями, которые были выявлены теоретически.

Заключение

В данной работе было проведено моделирование распространения фемтосекундного импульса и генерации спектрального суперконтинуума в трех средах с различными дисперсионными и нелинейными параметрами: в плавленом кварце, микроструктурированном кварцевом волокне и полом волноводе, заполненном аргоном. Зависимости времени когерентности от длины волны для всех трех сред обладают определенными отличительными особенностями. Например, при увеличении длины волны исходного импульса время когерентности уменьшается, однако существует его скачкообразное увеличение, которое для плавленого кварца и полого волновода, заполненного аргоном, приходится на длину волны нулевой дисперсии групповой скорости. Также при увеличении длительности для всех трех сред и двух различных интенсивностей, ширина области скачкообразного увеличения времени когерентности уменьшается. Следует отметить, что в зависимости от взаимного влияния дисперсии и нелинейности, которое зависит как от параметров среды, так и от интенсивности исходного импульса, время когерентности в этой области для исходного импульса длительностью 80 фс может как превосходить, так и быть меньше времени когерентности для исходного импульса длительностью 10 фс. Однако время когерентности в области нормальной дисперсии групповой скорости всегда больше у исходного импульса большей длительности.

Малое значение времени когерентности суперконтинуума, генерируемого в области аномальной дисперсии среды, вызвано разрушением временной структуры, формируемой в процессе его генерации. Уменьшение значения времени когерентности в области нормальной дисперсии среды с увеличением длины волны импульса на входе может быть объяснено его обратной зависимостью от коэффициента линейной фазовой модуляции, которая формируется во временной структуре в процессе генерации спектрального суперконтинуума. Это было подтверждено с помощью как аналитического анализа, так и численного моделирования. Наличие скачкообразного увеличения времени когерентности в области нулевой дисперсии среды связано с тем, что в этой области генерируемый суперконтинуум имеет однородную временную структуру и низкий коэффициент наклона чирпа.

Результаты проведенных экспериментальных исследований повторяют закономерности, полученные теоретически. Экспериментальная зависимость времени когерентности от центральной длины волны импульса на входе в среду схожа с теоретически полученной зависимостью в области перехода от нормальной к нулевой дисперсии для другого микроструктурированного волокна.

Публикации

1. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Расчет времени когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума в кварцевом оптическом волокне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 3. С. 42–46.
2. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Исследование зависимости времени когерентности спектрального суперконтинуума от параметров исходного импульса // Сборник трудов VIII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013». СПб., 2013. С. 151–153.
3. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Определение зависимостей времени когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума в плавленом кварце от параметров импульса на входе // Труды XXI Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2014». СПб., 2014.
4. Melnik M.V., Tsyppkin A.N. The calculation of the coherence time of spectral supercontinuum at the output of the fused silica with different parameters of the initial pulse // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9200. P. 92000W–92000W-7.

5. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Определение и выявление основных закономерностей изменения времени когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума в различных оптических средах // Сборник трудов VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014». СПб., 2014. С. 15–17.
6. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Численное моделирование процессов формирования когерентности спектрального суперконтинуума в средах с различной дисперсией групповых скоростей // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». СПб., 2015. С. 168–170.

Литература

1. Козлов С.А., Сазонов С.В. Нелинейное распространение импульсов длительностью в несколько колебаний светового поля в диэлектрических средах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1997. Т. 111. № 2. С. 404–418.
2. Козлов С.А., Самарцев В.В. Основы фемтосекундной оптики. М., 2009. – 292 с.
3. Berkovskiy A.N. et al. Reducing the self-focusing efficiency of a femtosecond pulse in a transparent medium with dispersion when the number of light vibrations in it is decreased // Journal of Optical Technology. 2008. Vol. 75. No 10. P. 631–635.
4. Ranka J.K. et al. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm // Optics Letters. 2000. Vol. 25. No 1. P. 25–27.
5. Shpolyanskiy Y.A. et al. Analytic study of continuum spectrum pulse dynamics in optical waveguides // Applied Physics B. 2003. Vol. 77. No 2. P. 349–355.
6. Melnik M.V., Tsyppin A.N. The calculation of the coherence time of spectral supercontinuum at the output of the fused silica with different parameters of the initial pulse // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9200. P. 92000W–92000W-7.



Мохнаткина Евгения Викторовна
Факультет технологического менеджмента и инноваций
Кафедра финансового менеджмента и аудита
E-mail: mokhnatkina.e.v@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ АКТИВНОСТЬЮ В ЦЕЛЯХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ХОЗЯЙСТВУЮЩЕГО СУБЪЕКТА

Е.В. Мохнаткина

Научный руководитель – профессор А.А. Голубев

Успешное функционирование и устойчивое развитие хозяйствующих субъектов в современных экономических условиях зависит от степени использования инноваций. В условиях жесткой конкурентной борьбы важным условием эффективной деятельности предприятия становится создание новых продуктов или услуг, внедрение передовых технологий в процесс производства. Результаты применения инноваций – возможности снижения себестоимости продукции предприятия, привлечения инвестиций, выхода на новые рынки, а также повышения стоимости фирмы.

В связи с этим в настоящее время стала актуальной задача повышения инновационной активности субъектов хозяйствования.

Основная цель проекта – разработка механизма управления инновационной активностью хозяйствующего субъекта.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проанализированы подходы к определению и оценке инновационной активности хозяйствующего субъекта;
- разработаны критерии и методические основы оценки инновационной активности;
- разработана функциональная модель управления инновационной активностью хозяйствующего субъекта;
- разработана эконометрическая модель управления экономическим развитием хозяйствующего субъекта на основе регулирования инновационной активности.

В ходе выполнения работы были проанализированы существующие в отечественной и зарубежной практике подходы к определению и содержанию категории «инновационная активность» [1–7]. Автором был сделан вывод, что для комплексного отражения содержания данного понятия в его определение должны входить три составляющие: ресурсная, организационная и результативная.

Ресурсная составляющая инновационной активности хозяйствующего субъекта включает в себя ресурсы, используемые им в инновационной деятельности. Организационная составляющая инновационной активности показывает, в каких стадиях инновационного процесса организация принимает непосредственное участие, насколько она автономна на каждом его этапе и каким образом эти стадии связаны друг с другом в аспекте распределения ресурсов и их временных характеристик. Результативная составляющая инновационной активности отражает суммарный эффект инновационной деятельности предприятия, полученный за счет действий руководства данной организации и его персонала. Он характеризуется количеством созданных и внедренных организацией инноваций и оценивается экономическим, социальным, экологическим и другими результатами, полученными от их применения.

Сказанное выше позволяет автору предложить трактовку понятия инновационной активности как трехкомпонентной характеристики инновационной деятельности хозяйствующего субъекта, которая связывает количество и качество ресурсов, используемых хозяйствующим субъектом, с характеристиками форм его участия в инновационном процессе и результатами его инновационной деятельности.

Следующим этапом работы стал анализ отечественных и зарубежных подходов к оценке инновационной активности [1–4, 7–10], который показал, что предлагаемые решения не в полной мере соответствуют сущности данной категории, как ключевого фактора экономического развития, комплексности данной характеристики, прикладным задачам и условиям функционирования российских хозяйствующих субъектов. Данное положение обуславливает необходимость моделирования интегрального показателя инновационной активности субъекта хозяйствования, который позволит включить его в процесс управления экономическим развитием организации, будет охватывать все стороны рассматриваемого понятия и в то же время окажется доступным для понимания и расчета широкому кругу отечественных пользователей – менеджеров предприятий. Другими словами, для анализа инновационной активности требуется такой подход, который, с одной стороны, оценивал бы и характеризовал бы различные аспекты инновационной активности, а с другой – не был бы информационно перегруженным и охватывал только то, что действительно имеет существенное значение для управления экономическим развитием хозяйствующих субъектов.

Следующим этапом работы стал анализ предлагаемых отечественными авторами критериев оценки инновационной активности [11–15].

Результаты проведенного анализа позволили предложить подход, основанный на комплексном представлении критериев оценки инновационной активности хозяйствующего субъекта. В соответствии с целью исследования такой подход должен обеспечить научную состоятельность и ориентированность на решение практических задач управления инновационной активностью субъекта хозяйствования, определяющего условия его экономического развития.

Автором предлагается использовать следующие локальные критерии оценки инновационной активности хозяйствующего субъекта: инновационный потенциал, участие в инновационном процессе, результативность инновационной деятельности.

Критерий инновационного потенциала предприятия призван оценить ресурсную составляющую инновационной активности. При этом производится оценка количественных и качественных компонент данной составляющей. Критерий участия предприятия в инновационной деятельности направлен на оценку организационной составляющей инновационной активности. Критерий результативности инновационной деятельности призван оценить результативную составляющую инновационной активности.

Следующим этапом работы стало определение комплекса локальных показателей оценки инновационной активности субъекта хозяйствования и формул для их расчета.

Для оценки показателей каждого критерия предлагается применять метод экспертных оценок с целью приведения показателей к унифицированным единицам измерения, в силу того что все они являются разнородными. Для этого экспертам предлагается оценить показатель в диапазоне от 0 до 1.

При этом принимается следующая градация значений показателей: 0–0,09 – отсутствие признака; 0,10–0,27 – низкий уровень; 0,28–0,49 – уровень ниже среднего; 0,50–0,70 – средний уровень; 0,71–0,89 – уровень выше среднего; 0,90–0,99 – высокий уровень; 1,00 – очень высокий уровень.

Далее были получены формулы для расчета критериев оценки инновационной активности. На их основании сформирован интегральный показатель инновационной активности:

$$IA = k_1 * A + k_2 * B + k_3 * C, \quad (1)$$

где A – значение критерия инновационного потенциала предприятия; B – участия предприятия в инновационном процессе; C – результативности инновационной деятельности предприятия; $k_{1,2,3}$ – весовые значения критериев A , B , C в совокупной их оценке.

Для наглядного восприятия интегрального показателя инновационной активности можно использовать графический метод. Его смысл заключается в том, что оценивается площадь многоугольника, количество вершин которого равно количеству принимаемых частных характеристик. В нашем случае это будет треугольник, вершины которого представлены критериями инновационной активности предприятия (рис. 1).

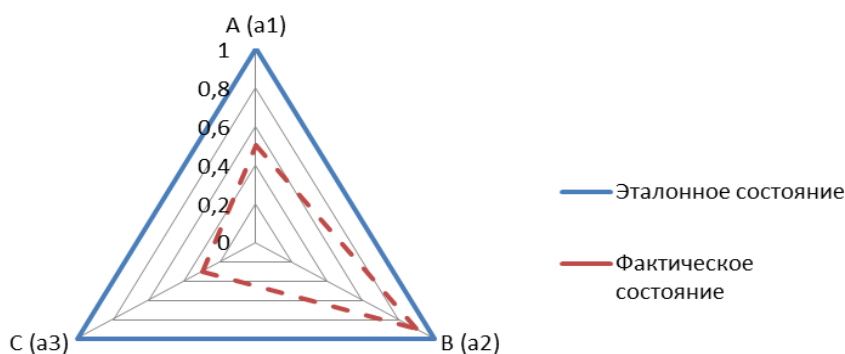


Рис. 1. Графический метод построения интегрального показателя инновационной активности предприятия

Площадь образовавшегося треугольника ABC соответствует текущему уровню инновационной активности предприятия.

Графическое представление интегрального показателя инновационной активности помогает лучше воспринимать разнородные характеристики, отражающие инновационную активность предприятия. С его помощью можно сопоставлять данное предприятие с другими конкурирующими или партнерскими, сравнивая аналогичные показатели. Исследуя изменения за несколько периодов, можно проанализировать динамику инновационной активности предприятия.

Следующим этапом стала разработка функциональной модели управления инновационной активностью хозяйствующего субъекта. Были описаны состав и связи между базовыми функциями менеджмента применительно к инновационной активности, описан процесс управления инновационной активностью. На заключительном этапе была разработана эконометрическая модель управления инновационной активностью.

Автором предложено сформировать комплексный механизм управления экономическим развитием хозяйствующего субъекта на основе анализа вариантов изменения уровня его инновационной активности.

В целях достижения большей объективности и достоверности предлагается осуществлять управление на основе формализованного метода – статистического корреляционно-регрессионного моделирования. При этом лучше использовать однофакторные регрессионные модели, что позволит избежать эффекта загромождения и усложнения полученных моделей.

Таким образом, модель управления примет вид: $Y=f(x) + \varepsilon$, где y – фактор-функция, результирующий признак (уровень экономического развития); x – фактор-аргумент (уровень инновационной активности); ε – ошибка модели.

Была проведена интерпретация модели на примере предприятия металлургической промышленности.

Заключение

В ходе выполнения работы был проведен анализ существующих подходов к определению понятия инновационной активности и сформировано его определение как взаимосвязанной совокупности трех компонент: ресурсной, организационной и результативной.

Разработаны критерии оценки инновационной активности хозяйствующего субъекта, сформирован набор локальных показателей оценки и предложены формулы для их расчета. Сформирован интегральный показатель инновационной активности и предложена его графическая интерпретация.

Разработана функциональная модель управления инновационной активностью, объяснены состав и связь базовых функций менеджмента в аспекте управления инновационной активностью.

Описана эконометрическая модель управления экономическим развитием хозяйствующего субъекта на основе регулирования инновационной активности. Проведена интерпретация модели на примере предприятия металлургической промышленности. Проверка модели подтвердила ее достоверность и значимость.

Публикации

1. Мохнаткина Е.В., Голубев А.А. Показатели, тенденции и факторы экономического развития хозяйствующих субъектов в Российской Федерации // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2015. № 3 (22). С. 106–116.

2. Мохнаткина Е.В. Сущность и сравнительный анализ применяемых подходов к оценке инновационной активности хозяйствующих субъектов // Экономика и предпринимательство. 2016. № 5. С. 815–820.

3. Голубев А.А., Мохнаткина Е.В. Исследование критериев оценки инновационной активности хозяйствующего субъекта // Вопросы управления. 2016. № 3 (40). С. 218–221.

Литература

1. Сущность категории «инновационная активность» // Проблемы повышения инновационной активности организации // Инновационный менеджмент: Учебное пособие / под ред. А.В. Барышевой. М., 2007. С. 247–250.
2. Измерение инновационной активности // Проблемы повышения инновационной активности организации // Инновационный менеджмент: Учебное пособие [Текст] / под ред. А.В. Барышевой. М., 2007. С. 256–264
3. Гунин В.Н. Сущность категории «инновационная активность» // Инновационная активность предприятий: сущность, содержание, формы: Монография / В.Н. Гунин. М., 2000. С. 6–8.
4. Гунин В.Н. Измерение инновационной активности // Инновационная активность предприятий: сущность, содержание, формы: Монография / В.Н. Гунин. М., 2000. С. 13–19.
5. Баранова И.В., Черепанова М.В. Методические подходы к оценке инновационной активности и инновационного потенциала вуза [Электронный ресурс]. 2015. – URL: http://journal.safbd.ru/sites/default/files/articles/sifbd-2006-4_163-166.pdf (дата обращения: 05.05.2015).
6. Цели и стратегии инновационного развития // Управление инновациями: учебник / В.П. Баранчеев, Н.П. Масленникова, В.М. Мишин. М., 2012. С. 55–61.
7. Трифилова А.А. Оценка инновационной активности промышленного предприятия // Инновации. – 2003. № 10. С. 51–55.
8. Gamal D. How to measure organization Innovativeness: An overview of Innovation measurement frameworks and Innovation Audit [Электронный ресурс]. 2011. – URL: <http://www.tiec.gov.eg/backend/Reports/MeasuringOrganizationInnovativeness.pdf> (accessed: 10.05.2015). – 35 p.
9. Eggink M.E. Innovation system performance: how to address the measurement of a system's performance // Journal of Innovation & Business Best Practices. 2012. Vol. 2012. No 593268. P. 1.
10. Stone A. et al. Measuring innovation and intangibles: A business perspective. Washington, 2008. – 29 p.
11. Товстых Л.Е. Новая инновационная сфера в экономике третьего тысячелетия и новые задачи // Инновации. 2003. № 6. С. 39–46.
12. Анисимов Ю.П., Борисенко И.А. Основы инновационного менеджмента: учебное пособие. Воронеж, 2000. – 36 с.
13. Володин С.В. Методы управления инновационным развитием организации: дис. ... канд. эконом. наук. М., 2012. – 50 с.
14. Журавлева Л.В. Оценка инновационной активности организации как открытой системы в конкурентной среде: автореф. дис. ... канд. эконом. наук. М., 2008. – 20 с.
15. Кулагина А.Г. Формирование инновационного механизма социально-экономического развития региона: автореф. дис. ... канд. эконом. наук. Чебоксары, 2006. – 24 с.



Павлов Михаил Сергеевич
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра химии и молекулярной биологии
E-mail: pavlin_90@list.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕЛКОВЫХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

М.С. Павлов

Научный руководитель – доцент П.И. Гунькова

Цель проекта заключалась в разработке технологии производства белковых молочных продуктов (творога и сыра), включающей организацию рационального и полного использования молочного сырья, а также применение инновационной функциональной добавки, позволяющей одновременно повысить биологическую ценность продукта, предотвратить потерю высокоценных белков с сывороткой (являющейся отходом производства) и снизить опасное загрязнение окружающей среды сывороточными белками.

За основу рабочей теории взято следующее предположение: причина пониженного выхода белковых продуктов заключается в высоком содержании сывороточных белков в молоке-сырье, что может быть обусловлено высоким содержанием в нем соматических клеток. Их количество в молоке повышается при заболевании животных маститом и другими болезнями, при нарушении режимов кормления, доения и содержания, что ведет к значительному изменению состава молока, особенно фракционного состава его белков.

При производстве белковых молочных продуктов в процессе сквашивания участвует в основном казеин, который составляет структуру самого продукта. Сывороточные белки и гидролизованные фракции казеина переходят в сыворотку, являющуюся побочным продуктом производства, содержащим биологически полноценные белки. В настоящее время переработка сыворотки налажена недостаточно и ее, к сожалению, зачастую приходится сбрасывать в канализацию. Это приводит к потере ценнейших компонентов сыворотки и повышению уровня загрязнения окружающей среды. Проблема ее утилизации заключается в том, что она содержит большое количество активных азотсодержащих соединений, являющихся сильными загрязнителями окружающей среды. С целью переработки сыворотки на предприятиях необходимо внедрять полный цикл утилизации, строить специальные (дорогостоящие) очистные сооружения.

Для решения поставленных задач теоретические и экспериментальные исследования велись в двух направлениях.

Первое заключалось в поисках критериев рационального отбора сырья. В настоящее время на заводах при приемке молока учитывают лишь массовую долю общего белка, не обращая внимания на содержание в нем структурирующего казеина и сывороточных белков.

Второе направление состояло в исследовании возможности использования при производстве белковых молочных продуктов ферментного препарата трансглутаминазы, что позволило бы снизить потери сывороточных белков и низкомолекулярных пептидов, а также увеличить выход готового продукта за счет связывания сывороточных белков с казеином. С другой стороны, уменьшение содержания белков в сыворотке снизит загрязнение окружающей среды и позволит упростить утилизацию отходов производства.

Исходя из поставленной цели, в работе решались следующие задачи:

- изучение физико-химических свойств, состава и микробной обсемененности молока-сырья, поступающего на молокоперерабатывающие заводы нашего региона;
- анализ факторов, оказывающих наибольшее влияние на выход белкового молочного продукта (творога);
- выявление основного фактора, снижающего выход готового продукта;
- определение критериев рационального отбора сырья для белковых молочных продуктов;
- разработка технологии внесения ферментного препарата для достижения максимального эффекта при оптимальных затратах.

Результаты исследований

1. Собраны статистические данные по физико-химическим показателям и микробиологической обсемененности молока-сырья, производимого в настоящее время в Ленинградской области. Это необходимо для оценки его качества, распределения на производство определенных видов продукта, выбора и разработки технологий, позволяющих получать качественную, экологически безопасную продукцию. Выявлено, что в молоко-сырье, произведенном в нашем регионе, содержится от 2,80 до 3,25 % общего белка. При этом при равной массовой доле в молоке общего белка, состав белков сильно различался. Массовая доля казеина в исследуемых образцах изменялась от 1,40 до 3,00 %, содержание сывороточных белков за период наблюдения колебалось в пределах от 0,40 до 1,40 %. Количество белков в молоко-сырье находилось в значительной зависимости от хозяйства-поставщика.

2. Определены показатели молока, необходимые для выработки белковых молочных продуктов (творога). Показано, что для получения творога высокого качества необходимо использовать молоко с содержанием казеина не менее 3,00 %, сывороточных белков – менее 0,5 %.

3. Выявлен факт того, что повышенное содержание сывороточных белков во многих случаях взаимосвязано с высоким содержанием соматических клеток в молоке. При этом результаты контроля соматических клеток с помощью нормированного вискозиметрического метода не всегда совпадали с потенциометрическим методом. Кроме того, содержание соматических клеток в молоке находится в прямой взаимосвязи с его бактериальной обсемененностью, состоянием здоровья коров и, следовательно, биологической безопасностью получаемого продукта.

4. Выяснена взаимосвязь между содержанием в молоке соматических клеток, содержанием общего белка, отношением массовых долей казеина и сывороточных белков. Так в молоке с низким количеством соматических клеток (менее 300 тыс./см³) содержание общего белка составляет от 3,20 до 3,25 %, отношение массовых долей казеина к сывороточным белкам – от 7 до 9, а выход творога в среднем равен 215 г из 1 л молока. В молоке со средним содержанием соматических клеток (от 300 до 500 тыс./см³) количество общего белка изменяется в пределах от 3,09 до 3,20 %, отношение массовых долей казеина к сывороточным белкам составляет от 5 до 7, среднее содержание сывороточных белков – 0,5 %, а средний выход готового продукта – 205 г из 1 л. В молоке с высоким содержанием соматических клеток (от 500 до 1000 тыс./см³) количество общего белка составило от 2,80 до 3,12 %, отношение массовых долей казеина к сывороточным белкам менее 5, а количество сывороточных белков – выше 0,5 %, средний выход творога – 195 г.

Результаты экспериментальных выработок творога показали, что выход его из молока с содержанием соматических клеток менее 300 тыс./см³, при стабильно высоком качестве в среднем на 18 % превышает выход из равного количества молока, но с содержанием соматических клеток выше 500 тыс./см³. Таким образом, для выработки творога необходимо использовать молоко с содержанием соматических клеток не более 300 тыс./см³.

5. С целью наиболее полного использования всех белков молока, повышения выхода творога высокого качества, предотвращения сбрасывания сывороточных белков в окружающую среду предложено использовать при выработке творога фермент транскляминазу. Препарат фермента является безопасным для человека, имеет статус GRAS. Производство творога с его использованием осуществляется на стандартном оборудовании при использовании технологических режимов, применяемых обычно заводом. Внесение препарата фермента в молоко после заквашивания в количестве 200 г на тонну приводит к повышению выхода творога в среднем на 15 %, снижение содержания белков в сыворотке составляет около 30 %.

Заключение

Способ рационального подбора молока-сырья для производства белковых молочных продуктов с учетом содержания казеина и соматических клеток, а также технологию производства творога с внесением фермента транскляминазы в количестве 200 г на тонну молока сразу после заквашивания молока можно и следует использовать на заводах, перерабатывающих молоко.

Использование результатов представляемого проекта позволит:

- повысить выход из единицы сырья ценнейшего и необходимого людям всех возрастов белкового продукта, а следовательно, снизить его цену и увеличить доступность;
- предотвратить потери высокоценных сывороточных белков;
- предотвратить серьезное загрязнение белками окружающей среды.

Публикации

1. *Гулькина П.И., Павлов М.С.* Влияние количества соматических клеток в молоке на процесс выработки, выход и качество творога [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2012. № 2 (14). URL: http://openbooks.ifmo.ru/read_processes/9160/9160.pdf (дата обращения: 05.04.17).
2. *Павлов М.С.* Изучение влияния соматических клеток в молоке на его состав // Сборник трудов молодых ученых. Ч. 1. СПб., 2012. С. 59–62.
3. *Павлов М.С.* Микрофлора молока хозяйств ленинградской области // Материалы за IX Международна научна практична конференция «Бъдещето въпроси от света на науката 2013». Т. 32. София, 2013. С. 53–56.
4. *Гулькина П.И., Павлов М.С.* Влияние состава и свойств молока-сырья на качество и выход творога. Взаимосвязь между минеральным составом молока и количеством соматических клеток в нем // Сборник трудов II Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2013. С. 109–111.
5. *Павлов М.С.* Влияние микробной обсемененности коровьего молока на качество и выход творога // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 4. СПб., 2014. С. 136–138.
6. Патент на изобретение 2504770 Российская Федерация. Способ определения качества молока / П.И. Гулькина, М.С. Павлов, М.В. Кольцова. Опубл. 20.01.2014.
7. *Павлов М.С.* Взаимосвязь между потреблением молочных продуктов и возникновением болезней сердечно-сосудистой системы у человека // Новое слово в науке: перспективы развития: материалы IV Международной научно-практической конференции. Чебоксары, 2015. С. 158–159.
8. *Гулькина П.И., Павлов М.С., Скопичев В.Г.* Взаимосвязь между микробной обсемененностью, составом коровьего молока, выходом и качеством получаемых из него белковых продуктов // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2015. № 3. С. 128–133.



Парамонов Алексей Владимирович
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: avp.atrax@gmail.com

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВОЗМУЩЕННЫМИ СИСТЕМАМИ С НЕИЗВЕСТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

А.В. Парамонов

Научный руководитель – доцент Д.Н. Герасимов

Цель работы – решение задачи адаптивной компенсации неизвестного возмущения для класса линейных объектов с неизвестным запаздыванием по входу.

Исследования возмущенных динамических систем с запаздыванием в канале управления мотивировано широким практическим применением и внедрением подобных систем в областях робототехники и судостроения. Результаты применимы для проектирования антенных, химических, биологических, гидравлических и других технических систем, которые подвержены влиянию гармонического возмущения и имеют запаздывание в каналах управления.

Рассматриваемая проблема может быть разделена на две задачи: компенсация возмущений и компенсация запаздывания. Среди существующих алгоритмов компенсации возмущений в объектах управления были выделены: метод внутренней модели [1] и идентификационный подход [2–4]. Для компенсации запаздывания было решено использовать следующие алгоритмы: предиктор Смита [5], редуцированный подход [6] и метод дифференциальных уравнений в частных производных [7, 8].

В рамках данного проекта предлагается решение задачи компенсации неизвестного возмущения для класса линейных объектов с неизвестным запаздыванием по входу и для систем с неизвестным вектором состояния с использованием параметризованной внутренней модели возмущения и наблюдателя вектора состояния генератора возмущения без процедуры идентификации параметров.

Постановка задачи

Рассматривается класс устойчивых линейных объектов вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + b(u(t - \tau) + \delta), \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния; u – сигнал управления; y – регулируемая переменная; A , b , C – матрицы соответствующих размерностей; τ – запаздывание по входу; δ – неизмеряемое ограниченное возмущение $|\delta| \leq \bar{\delta}$, которое может быть представлено как выход внутренней модели:

$$\begin{cases} \delta = Hz, z(0), \\ \dot{z} = \Gamma z \end{cases} \quad (2)$$

где z – неизмеряемый вектор состояния; $\Gamma \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – матрица постоянных коэффициентов, все собственные значения которой являются некратными и лежат на

мнимой оси; $H \in \mathbb{R}^{1 \times m}$ – постоянный вектор. Пара (Γ, H) является полностью наблюдаемой.

Верхняя граница запаздывания по входу $\bar{\tau}$ известна.

Необходимо найти закон управления, обеспечивающий компенсацию неопределенностей модели (2) и запаздывания τ , устойчивость замкнутой системы при любых начальных условиях, ограниченность всех сигналов и выполнение целевого условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y\| = 0. \quad (3)$$

Параметризация модели возмущения и синтез наблюдателя (система с неизвестным запаздыванием)

Параметризация модели возмущения [9–11] сводит ее неопределенность к набору неизвестных постоянных параметров, связанных с известными базисными функциями, и позволяет применить универсальные методы адаптивного и робастного управления.

Модель (2) может быть представлена как параметризованная внутренняя модель возмущения:

$$\delta = \theta^T \xi, \quad (4)$$

где регрессор $\xi \in \mathbb{R}^m$ сгенерирован фильтром:

$$\dot{\xi} = G\xi + l\delta, \quad (5)$$

где G – произвольная гурвицева матрица, образующая с вектором $l \in \mathbb{R}^n$ полностью управляемую пару; θ – вектор постоянных коэффициентов.

С помощью подстановки (4) в (5) получаем эквивалентную модель возмущения:

$$\dot{\xi} = (G + l\theta^T)\xi. \quad (6)$$

Однако фильтр (5) физически нереализуем, так как использует в качестве входного сигнала неизмеряемую переменную δ . Поэтому будем рассматривать (5) в качестве виртуального наблюдателя возмущения [12, 13]. Основное назначение наблюдателя состоит в сведении неопределенности сигнала к параметрической неопределенности линейной регрессионной модели.

Сформируем оценку $\hat{\xi}$ вектора состояния ξ виртуального наблюдателя возмущения (4), (5) с помощью следующего физически реализуемого наблюдателя возмущения:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}} &= \eta + N\dot{x}, \\ \dot{\eta} &= G\eta + (GN - NA)x - Nbu(t - \bar{\tau}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\eta \in \mathbb{R}^m$ – вспомогательный вектор, а матрица $N \in \mathbb{R}^{m \times n}$ удовлетворяет равенству $Nb = l$.

Введем ошибку наблюдения $e_\xi = \xi - \hat{\xi}$. Путем дифференцирования данной ошибки на основании (1), (5) и (7) была доказана ее экспоненциальная сходимость к нулю [13]. Как следствие, возмущение (2) может быть представлено как $\delta = \theta^T \hat{\xi}$, где $\hat{\xi}$ сгенерировано наблюдателем (7).

Для параметризации возмущения системы с неизвестным запаздыванием вводится матричная экспонента $R = e^{-(G+l\theta^T)\bar{\tau}}$ и на основании фундаментального решения (6) выводится выражение [6, 14]:

$$\xi(t - \bar{\tau}) = R\xi(t). \quad (8)$$

Поскольку вектор θ неизвестен, параметры выражения (8) заменяются на их оценки:

$$\begin{aligned} \hat{\xi}(t - \bar{\tau}) &= \hat{R}\hat{\xi}(t), \\ \hat{\delta}(t) &= \theta^T \hat{\xi} = \psi^T \hat{\xi}(t - \bar{\tau}) = \theta^T R^{-1} \hat{\xi}(t - \bar{\tau}), \end{aligned}$$

где $\hat{\xi}$ генерируется наблюдателем (7), $\psi^T = \theta^T R^{-1}$ – вектор неизвестных параметров, $\hat{R} = e^{-(G+\hat{\theta}^T)\tau}$ – матричная экспонента с настраиваемым параметром $\hat{\theta}$.

Используя принцип непосредственной компенсации, можно построить следующий закон управления, компенсирующий возмущающее воздействие и запаздывание:

$$u = -\hat{\psi}^T \xi = -(\hat{R}^{-T} \hat{\theta})^T \hat{\xi}, \quad (9)$$

где \hat{R} , $\hat{\theta}$ и $\hat{\psi}$ – оценки неизвестных параметров R , θ и ψ соответственно.

Параметризация модели возмущения и синтез наблюдателя (система с неизвестным вектором состояния)

Для параметризации возмущения системы с неизвестным вектором состояния рассмотрим динамические фильтры вида:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= \Lambda v_1 + e_{n-1} u(t - \tau), \\ \dot{v}_2 &= \Lambda v_2 + e_{n-1} y, \end{aligned}$$

где $v_1 \in \mathbb{R}^{n-1}$, $v_2 \in \mathbb{R}^{n-1}$ – векторы состояния фильтров, $e_{n-1}^T = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T$, $e_{n-1} \in \mathbb{R}^{n-1}$, Λ – произвольная гурвицева матрица.

Сигналы, генерируемые динамическими фильтрами, позволяют построить наблюдатель возмущения $\xi^T(t - \tau) = [v_1, v_2]$.

При настраиваемом регуляторе:

$$u(t) = -\hat{\psi}^T \xi \quad (10)$$

выход объекта может быть представлен в виде:

$$y(t) = W(s) [\psi^T \xi(t - \tau) + u(t - \tau)] = W(s) [\tilde{\psi}(t - \tau)^T \xi(t - \tau)],$$

где $W(s) = C(sI - A)^{-1} b$.

Построение настраиваемого регулятора и синтез алгоритма адаптации (система с неизвестным запаздыванием)

Структура наблюдателя и параметризованная модель возмущения позволяют построить настраиваемый регулятор. Для выполнения закона управления осуществляется процедура замены неизвестных параметров на их оценки, в итоге осуществляется построение настраиваемого регулятора, где $\hat{\xi}$ генерируется реализуемым наблюдателем, а для генерации $\hat{\psi}$ необходимо построить алгоритм адаптации.

В данном случае модель ошибки строится путем подстановки (9) в (1):

$$\dot{x} = Ax + b \tilde{\psi}(t - \bar{\tau}) \hat{\xi}(t - \bar{\tau}), \quad (11)$$

где $\tilde{\psi}(t - \bar{\tau}) = \psi - \hat{\psi}(t - \bar{\tau})$ – вектор параметрических ошибок с запаздыванием.

Посредством функции Ляпунова построим алгоритм адаптации:

$$\dot{\hat{\psi}} = \gamma \frac{\hat{\xi}(t - \bar{\tau})}{1 + \|\hat{\xi}(t - \bar{\tau})\|^2} b^T P x, \quad (12)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации, симметрическая положительно определенная матрица P является решением уравнения $A^T P + PA = -Q$ при $Q = Q^T \succ 0$.

Замкнутая система (11), (12) может быть представлена в следующем виде:

$$W(s) = b^T P (sI - A)^{-1} b,$$

где s – комплексная переменная.

$W(s)$ – строго вещественно положительная функция и $\left\| \hat{\xi} \hat{\xi}^T / \left(1 + \|\hat{\xi}\|^2 \right) \right\| \leq 1$. Поэтому можно исследовать устойчивость замкнутой системы с передаточной функцией $\gamma \frac{1}{s} e^{-\bar{\tau}s} W(s) = \gamma H(s, \bar{\tau})$ с помощью критерия Найквиста и найти критическое значение коэффициента адаптации γ_0 , соответствующее границе устойчивости замкнутой системы [15].

Для известной верхней границы запаздывания $\bar{\tau}$ критическое значение коэффициента адаптации γ_0 может быть рассчитано по следующему соотношению:

$$\gamma_0 = \frac{1}{|H(j\Omega, \bar{\tau})|},$$

где $j = \sqrt{-1}$, Ω – частота, удовлетворяющая условию $\arg \{H(j\Omega, \bar{\tau})\} = -\pi$.

Таким образом, компенсатор состоит из наблюдателя возмущения (7), настраиваемого регулятора (11) и алгоритма адаптации (12).

Построение настраиваемого регулятора и синтез алгоритма адаптации (система с неизвестным вектором состояния)

Для синтеза настраиваемого регулятора системы с неизвестным вектором состояния преобразуем выход объекта следующим образом:

$$y = \tilde{\psi}(t-\tau)^T \bar{\xi}(t-\tau) + \hat{\psi}(t-\tau)^T \bar{\xi}(t-\tau) - W(s) [\hat{\psi}(t-\tau)^T \xi(t-\tau)],$$

где $\bar{\xi}(t-\tau) = W(s) [\xi(t-\tau)]$.

Введем в рассмотрение сигнал расширенной ошибки [13, 16]:

$$\hat{y} = y + W(s) [\hat{\psi}(t-\tau)^T \xi(t-\tau)] - \hat{\psi}(t)^T \bar{\xi}(t-\tau). \quad (13)$$

Тогда с последнее равенство примет вид:

$$\hat{y} = \tilde{\psi}(t-\tau)^T \bar{\xi}(t-\tau).$$

Последнее выражение представляет собой статическую модель ошибки, на базе которой строится алгоритм адаптации

$$\dot{\hat{\psi}} = \gamma \frac{\bar{\xi}(t-\tau)}{1 + \|\bar{\xi}(t-\tau)\|^2} \hat{y}. \quad (14)$$

Таким образом, закон адаптивного управления состоит из настраиваемого регулятора (10), расширенной ошибки (13) и алгоритма адаптации (14).

Результаты моделирования (система с неизвестным запаздыванием)

Моделирование проведено для объекта управления второго порядка:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (u(t-\tau) + \delta), \quad x(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$y = 3x_1 + 4x_2,$$

где $\delta = 5 \sin(2t)$. Матрица Q выбрана как $Q = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$. С помощью критерия Найквиста

рассчитано критическое значение коэффициента адаптации $\gamma_0 = 1,08$ для известной верхней границы запаздывания $\bar{\tau} = 1$ с. Был выбран коэффициент адаптации $\gamma = 1,07$.

Результаты моделирования для запаздывания $\tau = 0,8$ с представлены на рис. 1.

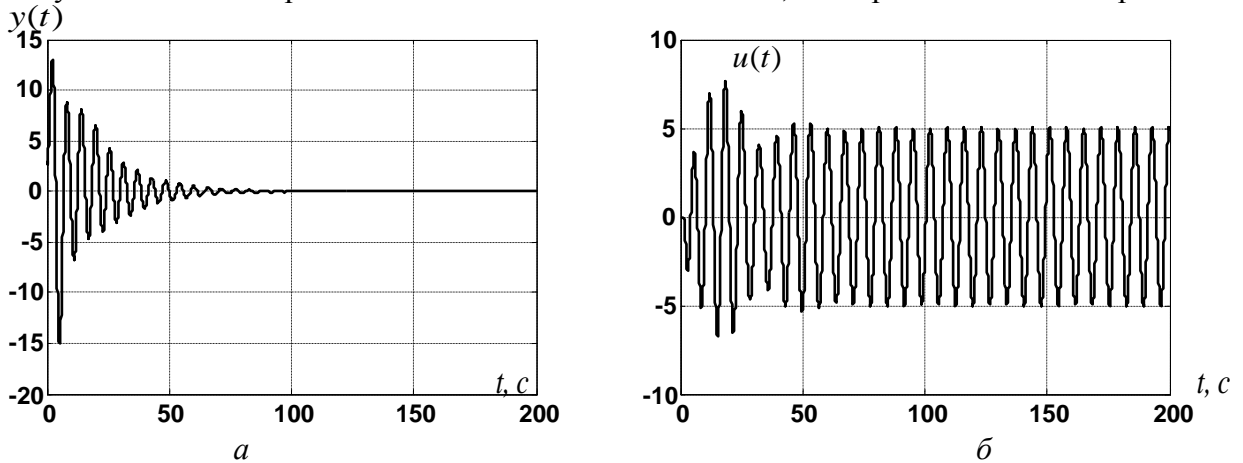


Рис. 1. Переходные процессы системы с неизвестным запаздыванием, замкнутой адаптивным регулятором: а – график выходного сигнала; б – график управляющего воздействия

Результаты моделирования (система с неизвестным вектором состояния)

Моделирование проведено для объекта управления второго порядка

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (u(t-\tau) + \delta), \quad x(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$y = 3x_1 + 4x_2,$$

где $\delta = 2 \cos(0,9t)$. Был выбран коэффициент адаптации $\gamma = 1,1$. Матрица Λ выбрана

$$\text{как } \Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & -4 & -6 & -4 \end{bmatrix}.$$

Результаты моделирования для запаздывания $\tau = 2$ с представлены на рис. 2.

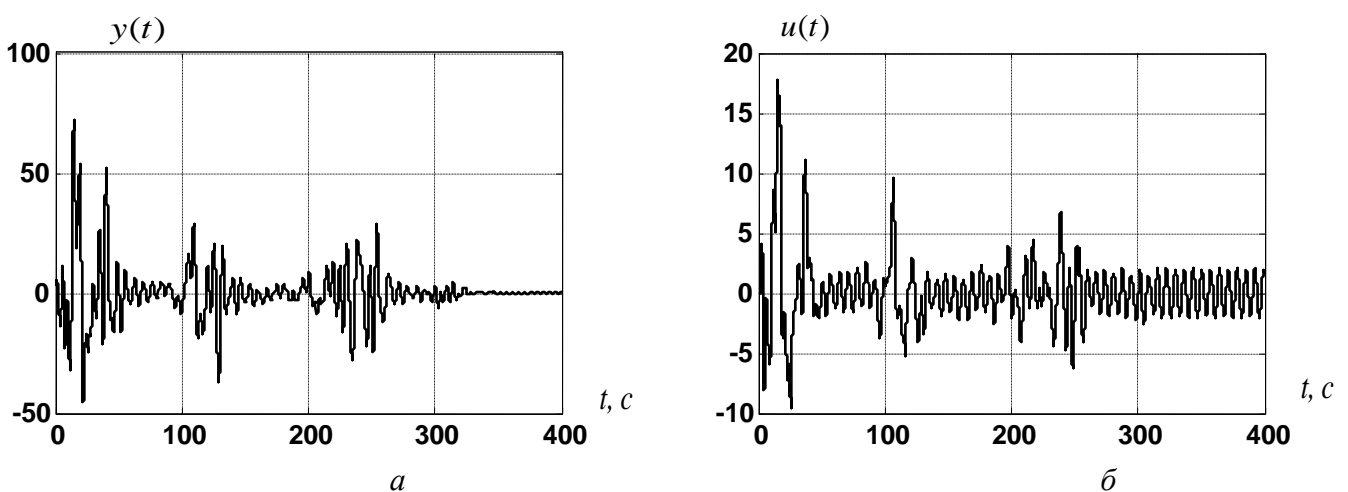


Рис. 2. Переходные процессы системы с неизвестным вектором состояния, замкнутой адаптивным регулятором: а – график выходного сигнала, б – график управляющего воздействия

Заключение

В рамках выполнения проекта были разработаны следующие методы адаптивной компенсации возмущения и запаздывания для линейных систем:

- разработан метод компенсации возмущений и запаздывания для объектов с неизвестным вектором состояния (управление по выходу);
- разработан метод компенсации возмущений и запаздывания для объектов при наличии неизвестного запаздывания по входу.

Результаты моделирования показали, что все представленные методы обеспечивают компенсацию неопределенностей моделей, возмущений и запаздывания, устойчивость замкнутой системы при любых начальных условиях, ограниченность всех сигналов и выполнение целевого условия $\lim_{t \rightarrow \infty} \|y\| = 0$ без идентификации параметров возмущения.

Публикации

1. *Gerasimov D.N., Nikiforov V.O., Paramonov A.V.* Adaptive disturbance compensation in delayed linear systems: Internal model approach // IEEE Conference on Control Applications (CCA). 2015. P. 1692–1696.
2. *Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O.* Adaptive disturbance compensation in linear systems with input arbitrary delay: Internal model approach // 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2016. P. 304–309.

Литература

1. *Nikiforov V.O.* Adaptive servocompensation of input disturbances // Proceedings of the 13th IFAC World Congress. San-Francisco, 1996. P. 175–180.
2. *Basturk H.I., Krstic M.* Adaptive sinusoidal disturbance cancellation for unknown LTI systems despite input delay // American Control Conference. 2015. Vol. 58. P.131–138.
3. *Бобцов А.А., Пыркин А.А.* Компенсация гармонического возмущения в условиях запаздывания по управлению // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 19–23 .
4. *Pyrkin A.A.* The adaptive compensation algorithm of an uncertain biased harmonic disturbance for the linear plant with the input delay // Automation and Remote Control. 2010. Vol. 71. No 8. P. 1562–1577.
5. *Smith O.M.* A controller to overcome dead time // ISA Journal. 1959. Vol. 6. No 2. P. 28–33.
6. *Artstein Z.* Linear systems with delayed controls: A reduction // IEEE Transactions on Automatic Control. 1982. Vol. 27. No 4. P. 869–879.
7. *Bresch-Pietri D. et al.* Adaptive control scheme for uncertain time-delay systems // Automatica. Vol. 48. No 8. P. 1536–1552.
8. *Bresch-Pietri D., Krstic M.* Delay-adaptive control for nonlinear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 59. No 5. P. 1203-1218.
9. *Nikiforov V.O.* Nonlinear servocompensation of unknown external disturbances // Automatica. 2001. Vol. 37. No 10. P. 1647–1653.
10. *Nikiforov V.O.* Adaptive servomechanism controller with an implicit reference model // International Journal of Control. 1997. Vol. 68. No 2. P. 277–286.
11. *Nikiforov V.O.* Adaptive non-linear tracking with complete compensation of unknown disturbances // European Journal of Control. 1998. Vol. 4. No 2. P. 132–139.
12. *Nikiforov V.O.* Observers of external deterministic disturbances. I. Objects with known parameters // Automation and Remote Control. 2004. Vol. 65. No 10. P. 1531–1541.
13. *Нукифоров В.О.* Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб., 2003. – 282 с. *Richard J.-P.* Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems // Automatica. 2003. Vol. 39. No 10. P. 1667–1694.

14. *Gerasimov D.N. et al.* Adaptive disturbance compensation in delayed linear systems: Internal model approach // IEEE Conference on Control Applications (CCA). 2015. P. 1692–1696.
15. *Никуфоров В.О., Фрадков А.Л.* Системы адаптивного управления с расширенной ошибкой // Автоматика и телемеханика. 1994. № 9. С. 3–22.



Погорелая Дарья Андреевна
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: pdaria@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Д.А. Погорелая

Научный руководитель – доцент В.Е. Стригалева

Одним из наиболее перспективных и давно исследуемых волоконно-оптических интерферометрических датчиков является волоконно-оптический датчик угловой скорости (ВОДУС). Принцип его действия основан на эффекте Саньяка – появление фазового сдвига встречных световых волн во вращающемся кольцевом интерферометре [1].

Чувствительность интерференционного измерения во многом зависит от положения рабочей точки интерферометра. Для поддержания ее широко применяются электрооптические фазовые модуляторы. Распространенными являются модуляторы на основе кристалла ниобата лития (LiNbO_3) благодаря их высокому быстродействию [2]. Один из существенных недостатков такого модулятора выражается в обратном пьезоэлектрическом эффекте и эффекте фотоупругости, следствием которых является возникновение резонансных механических колебаний и колебаний показателя преломления кристалла, что искажает полезный оптический сигнал [3]. В результате световой луч получает не только обусловленный электрооптическим эффектом фазовый сдвиг, но и паразитный фазовый сдвиг, вызванный резонансными колебаниями кристалла. Следствием описанных эффектов является снижение точностных характеристик волоконно-оптических интерферометрических датчиков.

Таким образом, целью данной работы является разработка метода повышения точности ВОДУС, позволяющего уменьшить влияние резонансных эффектов электрооптического модулятора на основе кристалла ниобата лития на выходной сигнал датчика.

Для достижения цели необходимо найти решение следующих задач:

- провести исследование и измерение резонансных эффектов ниобата лития;
- создать модель модулятора в COMSOL Multiphysics, позволяющую оценить величину обратного пьезоэлектрического эффекта и эффекта фотоупругости;
- произвести оценку влияния резонансных эффектов ниобата лития на выходной сигнал ВОДУС;
- провести поиск материала, подходящего для механической фиксации кристалла ниобата лития на кремниевой подложке;
- разработать способ подавления резонансных эффектов путем механической фиксации модулятора;

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

– оценить влияние разработанного способа на точностные параметры выходного сигнала волоконно-оптического датчика угловой скорости.

В основе исследуемого электрооптического модулятора лежит интегрально-оптическая схема, которая представляет собой сформированные по титан-диффузионной технологии канальные волноводы X-делителя оптической мощности луча в подложке ниобата лития. Ниобат лития обладает линейным электрооптическим эффектом, то есть под действием электрического поля в кристалле изменяются показатели преломления (эффект Поккельса). В области входных канальных волноводов X-делителя формируется система металлических электродов для создания электрического поля [4]. При подаче на электроды электрического напряжения изменяется показатель преломления материала канального волновода, а световая волна приобретает фазовый сдвиг. Главным преимуществом модуляторов на основе ниобата лития является быстродействие и высокий электрооптический коэффициент [5]. Однако они обладают и рядом недостатков, связанных с кристаллофизическими эффектами: пьезоэлектрическим, фотоэластическим (эффект фотоупругости) и другими. В результате их действия возникает паразитная модуляция разности фаз, связанная с резонансными механическими колебаниями кристалла и резонансными колебаниями его показателя преломления [6].

Измерение резонансных колебаний модулятора проводилось путем измерения изменений импеданса кристалла ниобата лития электрическим методом за счет контроля S-параметров (характеристика S11) [7] по следующей методике. Через высокочастотный электрический порт модулятора (в штатном режиме используется для подачи модулирующего напряжения) подавались электрические синусоидальные сигналы переменной частоты, при этом измерялась величина отраженного сигнала. Таким образом, энергия электрических сигналов, частоты которых совпадают с собственными резонансными частотами модулятора, частично расходуется на механические колебания, и поэтому амплитуда отраженного сигнала становится меньше начальной.

Исследования были проведены для двух диапазонов частот: от 1 до 600 кГц (НЧ) и от 300 кГц до 10 МГц (ВЧ). Измерение характеристики S11 для НЧ-диапазона проводилось при помощи измерительной установки на основе высокоточного цифрового осциллографа (*Rohde & Schwarz*, RTO1024), перестраиваемого генератора (*RIGOL* DG4102) и электрического квазициркулятора на основе операционных усилителей, а для ВЧ-диапазона – с помощью векторного анализатора цепей «Обзор».

Для устранения эффекта резонансных колебаний модулятора была выполнена механическая фиксация модулятора к кварцевой подложке с помощью жидкого натриевого стекла, отверждение которого происходило в течение восьми дней. Для сравнения на рис. 1 приведены результаты измерения характеристик отраженного от модулятора электрического сигнала различной частоты (характеристика S11) до и после фиксации модулятора жидким стеклом.

Как видно из результатов измерений, количество и глубина резонансных пиков значительно уменьшились, что говорит об усилении взаимодействия модулятора с кварцевой подложкой благодаря фиксации его отвержденным натриевым жидким стеклом. Благодаря этому происходит передача энергии механического колебания в подложку и дальнейшее его затухание.

Результаты измерения характеристики S11 показали наличие собственных резонансных частот модулятора, значения которых больше частоты модуляции в штатном режиме работы ВОДУС ($F_{\text{мод}} \approx 130$ кГц). Поэтому для проверки их влияния на интерферометрический сигнал ВОДУС были записаны данные интерферометрического отклика на частоте 5 ГГц с помощью высокоточного цифрового осциллографа (*Rohde & Schwarz*, RTO1024). Сигнал модуляции представлял собой меандр с размахом, соответствующим величине полуволнового напряжения (реализована прямоугольная смещающая модуляция без обратной связи). Длина выборки составила 0,044 мс, это примерно шесть интервалов собственной частоты τ .

Интерферометрический отклик, полученный за один период τ будем называть «полкой» интерферометрического отклика. Данное измерение было проведено в серийном ВОДУС, а также в ВОДУС с фиксированным модулятором. Внешний вид интерферометрического сигнала и его спектр за время τ для обоих случаев представлены на рис. 2 (произведено усреднение по 200 выборкам).

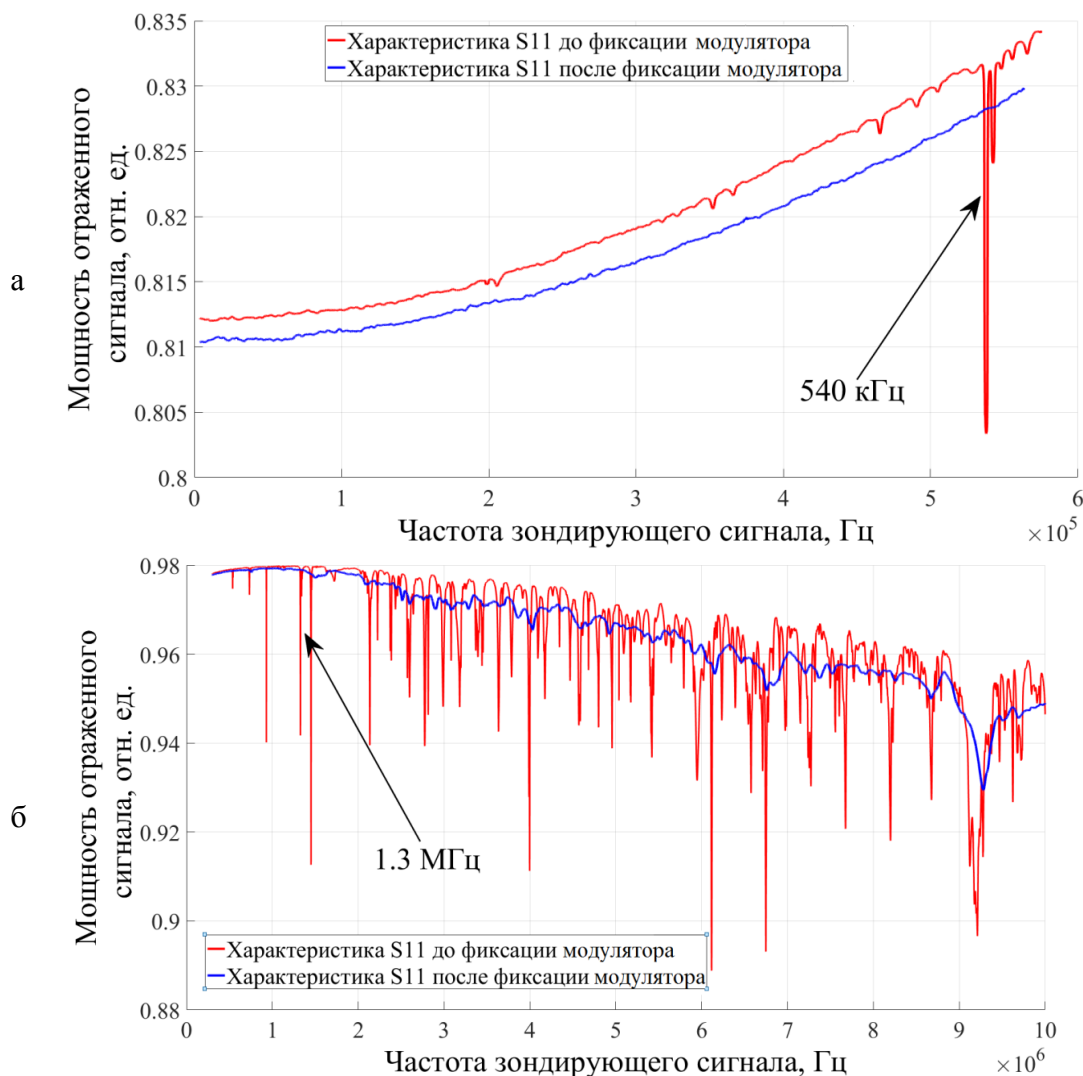


Рис. 1. Результат измерения характеристики S11:
а – НЧ-диапазон, б – ВЧ-диапазон

Из полученных результатов видно, что в серийном ВОДУС в отличие от ВОДУС с фиксированным модулятором наблюдаются колебания выходной интенсивности, а спектральный анализ показывает, что эти колебания соответствуют частоте 1,3 МГц. Пик на такой частоте наблюдался при измерении характеристики S11 (рис. 1), причем он был подавлен с помощью фиксации модулятора. Таким образом, результаты двух экспериментов согласуются.

Поскольку в соответствии с алгоритмом демодуляции при штатной работе ВОДУС мы получаем один информационный отсчет с одной «полки», то в зависимости от места взятия отсчета на «полке» величина детектируемой выходной мощности будет изменяться. При этом измеряемая величина пропорциональна разнице между соседними отсчетами. Таким образом, находя разницу между соседними «полками», записанными в результате эксперимента, можно проанализировать зависимость ошибки измерения угловой скорости от места взятия отсчета на «полке».

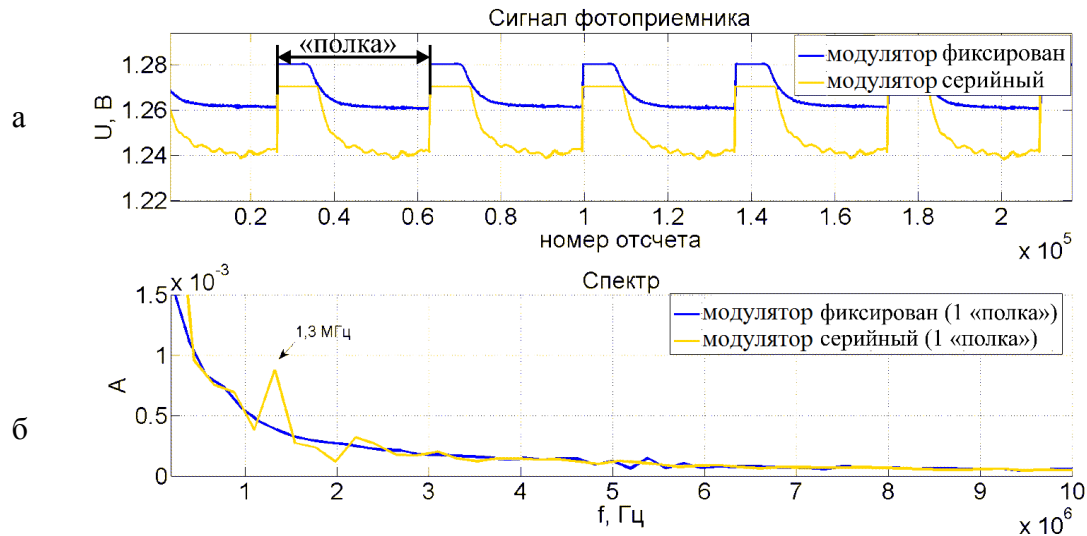


Рис. 2. Данные интерферометрического сигнала на частоте 5 ГГц:
 а – зависимость напряжения на выходе фотоприемника от номера отсчета выборки;
 б – спектр сигнала одной «полки»

Сравнение вычисленного значения разности фаз $\Delta\varphi_R$ с расчетным для серийного ВОДУС и ВОДУС с фиксированным модулятором представлено в Таблице.

Таблица

Сравнение ошибки измерения угловой скорости

Серийный ВОДУС		
$\Delta\varphi_R$ расчетная	$\Delta\varphi_R$ измер. – «узкая пила»	$\Delta\varphi_R$ измер. – «широкая пила»
$2,24 \cdot 10^{-4}$ рад	$2,29 \cdot 10^{-4}$ рад	$2,33 \cdot 10^{-4}$ рад
относительная погрешность	2,23 %	4,02 %
ВОДУС с фиксированным модулятором		
$\Delta\varphi_R$ расчетная	$\Delta\varphi_R$ измер. – «узкая пила»	$\Delta\varphi_R$ измер. – «широкая пила»
$2,25 \cdot 10^{-4}$ рад	$2,25 \cdot 10^{-4}$ рад	$2,26 \cdot 10^{-4}$ рад
относительная погрешность	≈ 0 %	0,44 %

— До фиксации
 — После фиксации

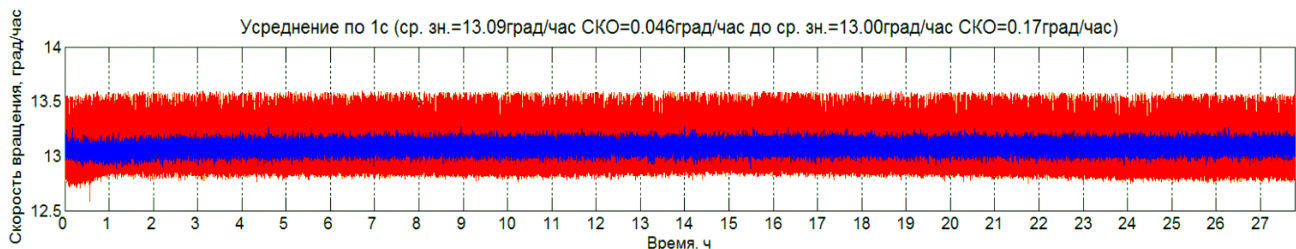


Рис. 3. ВОДУС на неподвижном основании до и после фиксации модулятора

Для подтверждения полученных результатов был записан выходной сигнал ВОДУС (измеренная угловая скорость) до фиксации модулятора и после нее на одном и том же серийном образце гироскопа. В процессе измерения ВОДУС находился на неподвижном

горизонтальном основании, тем самым измеряемая скорость оставалась неизменной и равной проекции угловой скорости Земли на ось ВОДУС. Зависимость измеренной скорости вращения от времени для обоих случаев показана на рис. 3. Величина среднеквадратического отклонения (СКО) после фиксации модулятора снизилась в 3,7 раза (с 0,17 °/ч до 0,046 °/ч) при осреднении по 1 с.

Таким образом, фиксация модулятора к кварцевой подложке с помощью отвержденного жидкого натриевого стекла приводит к уменьшению погрешности измерения ВОДУС.

Заключение

В работе предложено несколько путей исследования собственных резонансных частот модулятора в составе ВОДУС, в том числе электрическим методом путем контроля S-параметров. Предложен метод подавления резонансных эффектов путем механической фиксации модулятора жидким натриевым стеклом. Разработанный метод позволил снизить СКО и дрейф выходного сигнала волоконно-оптического датчика угловой скорости в несколько раз, тем самым повысив его точностные параметры. Работоспособность предложенного метода подтверждена внедрением в реальный образец волоконно-оптического датчика угловой скорости.

Результаты проекта могут быть использованы в волоконно-оптических интерферометрических датчиках, в оптической схеме которых необходим электрооптический фазовый модулятор. Например, в волоконно-оптических датчиках давления, температуры, напряженности электрического поля и других. В особенности результаты проекта применимы к ВОДУС, который может быть использован в навигационных системах для выработки навигационных параметров курса и направления, а также для мгновенного вычисления положения объекта в пространстве, например в системах стабилизации и наведения корабля.

Публикации

1. Волковский С.А., Погорелая Д.А., Смолоник М.А., Алейник А.С., Никитенко А.Н. Метод оценки паразитных эффектов электрооптического модулятора в волоконно-оптическом гироскопе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 780–786.
2. Pogorelaya D.A., Smolovik M.A., Strigalev V.E., Aleynik A.S., Deyneka I.G. An investigation of the influence of residual amplitude modulation in phase electro-optic modulator on the signal of fiber-optic gyroscope // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012040.
3. Погорелая Д.А., Алейник А.С., Смолоник М.А., Дейнека И.Г., Козлов В.Н., Михеев М.В. Исследование влияния нелинейности передаточной характеристики фазового электрооптического модулятора на сигнал волоконно-оптического гироскопа // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Sensorica-2015». СПб., 2015. С. 111–112.

Литература

1. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики. Л., 1990. – 256 с.
2. Naxha S. et al. Bandwidth estimation for ultra-highspeed lithium niobate modulators // Applied Optics. 2003. Vol. 42. No 15. P. 2674–2682.
3. Kotaro T. et al. Electro-optic effect of lithium niobate in piezoelectric resonance // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 112. P. 124105.
4. Патент 2176803 Российская Федерация. Способ изготовления волноводов интегрально-оптической схемы волоконно-оптического гироскопа / Курбатов А.М. Опубл. 10.12.2001.
5. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М., 1987. – 264 с.

6. Жданов А.Г. Резонансные оптические и магнитооптические эффекты в наноструктурах и фотонных кристаллах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2011. – 173 с.
7. S-parameter techniques for faster, more accurate network design. Palo Alto, 1997. – 79 p.



Попов Антон Игоревич
Естественнонаучный факультет
Кафедра высшей математики
E-mail: popov239@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОТЫ СИСТЕМЫ РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

А.И. Попов

Научный руководитель – профессор В.М. Уздин

Рассмотрена задача о полноте системы резонансных состояний для графов с двумя полубесконечными ребрами, моделирующих одномерные модели резонатора Гельмгольца. С помощью перехода в спектральное представление задача сводится к функциональной модели Секефальви-Надя и Фойаша, в которой полнота соответствует отсутствию сингулярного сомножителя при факторизации характеристической функции. С физической точки зрения полнота системы резонансных состояний отвечает возможности возбуждения любого состояния в резонаторе с помощью падающих волн, а ее отсутствие, соответственно, наличие таких состояний, которые не могут быть возбуждены падающими волнами. Рассмотрим волновую функцию электрона в ограниченной области. Соответствующие волновые функции – стоячие волны, образующие полный набор в L_2 . Таким образом, энергия электрона квантуется, она может принимать значения только из этого набора возможных энергий, а волновые функции могут быть только стоячими волнами. Любая функция может быть разложена в ряд по этим стоячим волнам. Попробуем изменить геометрию рассматриваемого графа. Пусть теперь это будет неограниченная область. Сохранится ли полнота в L_2 в ограниченной подобласти?

В работе проведены исследования свойств квантового графа с геометрией типа «дерево». Проверена полнота системы резонансных состояний в L_2 . Доказаны соответствующие теоремы.

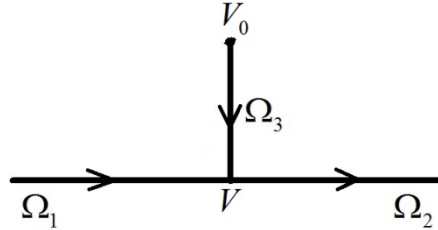
Постановка задачи

Структура исследуемого графа такова: ограниченная область соединена с бесконечной прямой. В этом случае энергия электрона уже не будет квантована. Спектр оператора становится непрерывным. Тем не менее, если электрон движется вдоль бесконечной прямой, он будет возбуждать волны внутри присоединенной ограниченной области. Разумеется, это не стоячие волны, но они имеют общую природу со стоячими. Задача настоящей работы состоит в том, чтобы ответить на вопросы: «Возможно ли разложить любую волновую функцию в ряд по этим новым волнам? Будет ли новый набор функций полон в L_2 »? Образующиеся новые

волны называются резонансными состояниями, а их энергии ($E = k^2$) – резонансами. Задачу о полноте системы резонансных состояний будем решать для квантового графа с геометрией типа «дерево».

Методы исследования

Рассмотрим граф следующей геометрии:



На каждом из ребер графа предполагается выполненным уравнение Шредингера $H\psi = k^2\psi$, где H – гамильтониан свободного электрона в одномерном случае, то есть оператор $-\frac{d^2}{dx^2}$. Наша задача – построить матрицу рассеяния $S(k)$, резонансы (k^2) и резонансные состояния ψ .

Определение. Оператор Шредингера H на Γ действует как $-\frac{d^2}{dx^2}$ на каждом ребре Ω_i .

$$\begin{aligned} \text{dom } H = \{ \psi \in C(\Gamma) \cap W_2^2(\Gamma \setminus V); \psi_1(-0) = \psi_2(+0) = \psi_3(L-0), \\ -\psi_1'(-0) + \psi_2'(+0) - \psi_3'(L-0) = \alpha\psi_2(0), \psi_3(0) = 0. \} \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь W_2^2 – пространство Соболева, $\frac{d\psi_i}{dx_i}(V)$ – производная решения в вершине V ребра Ω_i в

направлении, исходящем из вершины.

Работать будем в рамках схемы Лакса – Филлипса [1], [2]. Кратко опишем применяемый метод. Мы рассматриваем задачу Коши:

$$\begin{cases} u''_t = u''_{xx}, \\ u(x, 0) = u_0(x), u'_t(x, 0) = u_1(x), x \in \Gamma. \end{cases} \tag{2}$$

Пусть E – Гильбертово пространство двухкомпонентных функций (u_0, u_1) на графе с конечной энергией:

$$P(u_0, u_1) \mathbb{P}_E^2 = 2^{-1} \int_{\Gamma} (|u'_0|^2 + |u_1|^2) dx.$$

Решающий оператор для задачи $U(t)$, $U(t)(u_0, u_1) = (u(x, t), u'_t(x, t))$ (2) будет унитарным в E .

Унитарная группа $U(t)|_{t \in \mathbb{R}}$ имеет два ортогональных (в E) подпространства, D_- и D_+ (входящее и исходящее).

Лемма 2.11. Исходящее подпространство D_+ имеет следующие свойства:

- (a) $U(t)D_+ \subset D_+, t > 0$;
- (b) $\bigcap_{t > 0} U(t)D_+ = \{0\}$,
- (c) $\overline{\bigcup_{t < 0} U(t)D_+} = E$.

Свойства D_- – аналогичны (с заменой $t > 0 \leftrightarrow t < 0$).

Мы хотим найти подпространства, которые дадут нам волны, бегущие только в одном направлении. Согласно подходу Лакса – Филлипса, такие подпространства существуют (Лемма 2.1).

Лемма 2.22. Подпространства D_{\pm} можно выбрать следующим образом:

$$D_+ = \{(u_0, u_1) : -u_1 = u'_0, x \in \Omega_1; u_1 = u'_0, x \in \Omega_2; u_1 = u_0 = 0, x \in \Omega_3\},$$

$$D_- = \{(u_0, u_1) : u_1 = u'_0, x \in \Omega_1; -u_1 = u'_0, x \in \Omega_2; u_1 = u_0 = 0, x \in \Omega_3\}.$$

Лемма 2.33. Пара изометрических отображений $T_{\pm} : E \rightarrow L_2(\mathbb{R}, \mathbb{C}^2)$ имеет следующие свойства: $T_{\pm}U(t) = \exp(ikt) \cdot T_{\pm}$, $T_+D_+ = H_+^2(\mathbb{C}^2)$, $T_-D_- = H_-^2(\mathbb{C}^2)$, где H_{\pm}^2 – пространство Харди.

Отображения T_{\pm} переводят решающий оператор $U(t)$ в оператор умножения. Более того, они переводят D_+ и D_- в пространства Харди. Отображения $T_+(T_-)$ дают исходящее (входящее) спектральное представление унитарной группы $U(t)$. Пусть $K = E! (D_+ \oplus D_-)$. Рассмотрим полугруппу $Z(t) = P_K U(t)|_K$, $t > 0$, P_K – проектор на K . Обозначим за B генератор полугруппы $Z(t) : Z(t) = \exp(iBt), t > 0$. Исходные данные, которые являются собственными векторами B , называются резонансными состояниями. $T_-T_+^{-1}$ – оператор рассеяния. Он является оператором умножения на матрицу-функцию на вещественной оси и может быть аналитически продолжен в верхнюю полуплоскость. Это продолжение и называется матрицей рассеяния $S(k)$. Построим матрицу рассеяния для нашей задачи. Решение задачи рассеяния имеет следующий вид:

$$\psi(x) = \begin{cases} e^{ikx} + re^{-ikx}, & x \in \Omega_1, \\ te^{ikx}, & x \in \Omega_2, \\ p \sin(kx), & x \in \Omega_3. \end{cases} \quad (3)$$

Решение (3) должно удовлетворять условиям (1). Это приводит к соотношениям:

$$\begin{cases} 1 + r = t, \\ t = p \sin(kL), \\ -ik + ikt - ik - tk \cot(kL) + ikt = \alpha t. \end{cases} \quad (4)$$

Итак, мы получаем следующие выражения для коэффициентов передачи и отражения:

$$t = \frac{2ik}{2ik - \alpha - k \cot(kL)}, \quad (5)$$

$$r = \frac{\alpha + k \cot(kL)}{2ik - \alpha - k \cot(kL)}, \quad (6)$$

$$p = \frac{2ik}{\sin(kL)(2ik - \alpha - k \cot(kL))}. \quad (7)$$

Матрица рассеяния имеет следующий вид:

$$S(k) = \begin{pmatrix} t & r \\ r & t \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Резонансы являются полюсами матрицы рассеяния. В точке резонанса $\det S(k) = \infty$. Соответственно, полюса k_* матрицы рассеяния $S(k)$ – это корни уравнения:

$$\cot(kL) = 2i - \frac{\alpha}{k}, \quad (9)$$

Уравнение (9) приводит к следующей системе:

$$\frac{\sin(k_r L) \cos(k_r L)}{\sin^2(k_r L) + \sinh(k_i L)} = -\frac{\alpha k_r}{k_r^2 + k_i^2}, \quad (10)$$

$$\frac{-\sinh(k_i L) \cosh(k_i L)}{\sin^2(k_r L) + \sinh(k_i L)} - 2 = \frac{\alpha k_i}{k_r^2 + k_i^2}. \quad (11)$$

Здесь $k = k_r + ik_i$.

При $\alpha = 0$ решение (резонанс) находится в явной форме:

$$k_r = \frac{\pi n}{L}, \quad k_i = \frac{1}{L} \ln(2 \pm \sqrt{3}), \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (12)$$

Резонансные состояния имеют следующий вид:

$$\psi_*(x) = \begin{cases} Ae^{-ik_*x}, & x \in \Omega_1, \\ Be^{ik_*x}, & x \in \Omega_2, \\ C \sin(k_*x), & x \in \Omega_3. \end{cases} \quad (13)$$

где A, B, C – некоторые коэффициенты.

Проверка полноты системы резонансных состояний

Полноту системы резонансных состояний в $L_2(\Omega_3)$ для графа с геометрией типа «дерево» можно доказать с помощью следующей теоремы (из [3]):

Теорема 3.1.4 Следующие утверждения эквивалентны:

1. Оператор Z – полный в L_2 ;

$$2. \lim_{r \rightarrow 1-0} \int_{L_r} \log_e |\det S(z)| \frac{dz}{(z-1)^2} = 0.$$

Здесь L_r – образ кривой $|\zeta| = r < 1$ под действием отображения $z = i \frac{1+\zeta}{1-\zeta}$.

Доказательство: Для графа рассматриваемой геометрии определитель матрицы рассеяния имеет вид:

$$\det S(k) = |t|^2 + |r|^2. \quad (14)$$

Учитывая, что:

$$\cot(kL) = \frac{\sin(k_r L) \cos(k_r L)}{\sin^2(k_r L) + \sinh(k_i L)} + i \frac{-\sinh(k_i L) \cosh(k_i L)}{\sin^2(k_r L) + \sinh(k_i L)} = a + ib, \quad (15)$$

получаем:

$$\det S = \frac{4k_r^2 + 4k_i^2 + (k_i b - k_r a - \alpha)^2 + (k_r b + k_i a)^2}{(k_i(b-2) - \alpha - k_r a)^2 + (k_r(2-b) - k_i a)^2}. \quad (16)$$

Замечание. Очевидно, что если $k_i = 0$ ($b = 0$), то выполнено следующее свойство:

$$\det S = \frac{4k_r^2 + (k_r a + \alpha)^2}{(-\alpha - k_r a)^2 + 4k_r^2} = 1. \quad (17)$$

Полюса k_* матрицы рассеяния – это корни уравнения (k_*):

$$\cot(kL) = 2i - \frac{\alpha}{k}, \quad (18)$$

Соответственно, корни матрицы $S(k)$ находятся в точках \bar{k}_* ($\lambda = \bar{k}_*^2$). Уравнение (18) можно привести к следующей системе:

$$\frac{\sin(k_r L) \cos(k_r L)}{\sin^2(k_r L) + \sinh(k_i L)} = -\frac{\alpha k_r}{k_r^2 + k_i^2}, \quad (19)$$

$$\frac{-\sinh(k_i L) \cosh(k_i L)}{\sin^2(k_r L) + \sinh(k_i L)} - 2 = \frac{\alpha k_i}{k_r^2 + k_i^2}. \quad (20)$$

При $\alpha = 0$ решение находится в явной форме:

$$k_r = \frac{\pi n}{L}, k_i = -\frac{1}{2} \ln 3, n \in \mathbb{Z}. \quad (21)$$

Соответственно, $S(k)$ имеет корни в точках $k_n = \frac{\pi n}{L} + i \frac{1}{2} \ln 3, n \in \mathbb{Z}$. Нетрудно убедиться, что в этом случае $Im k_n$ не зависит от n .

При $\alpha \neq 0$ система уравнений (10), (11) не имеет решений в явной форме. Однако для правой части системы (19), (20) можно сделать оценку. Тогда, согласно теореме Руше, только конечное число корней может находиться ниже определенной линии в \mathbb{C}_+ , параллельной вещественной оси (нетрудно получить асимптотики по $n, n \rightarrow \infty$, или по $\alpha, \alpha \rightarrow 0$, но сейчас нам это не нужно). А значит, вдоль вещественной оси существует полоса без корней. Воспользуемся предельным переходом (пункт 2 теоремы 3.1) и придем к заключению теоремы.

Теорема 3.2. Система резонансных состояний оператора Шредингера H на графе Γ полна в $L_2(\Omega_3)$ и не полна в $L_2(\Omega_3 \cup (-b, b))$ при $b > 0$.

Первую часть теоремы мы только что доказали. Для доказательства второй части слегка изменим исходные построения. Подпространства D_{\pm} выберем иначе, чем в Лемме 1.2:

$$\begin{aligned} D_+ &= \{(u_0, u_1) : -u_1 = u'_0, x \in \Omega_1 \setminus [-b, 0]; u_1 = u'_0, x \in \Omega_2 \setminus [0, b]; \\ &\quad u_1 = u_0 = 0, x \in \Omega_3 \cup (-b, b)\}, b > 0, \\ D_- &= \{(u_0, u_1) : u_1 = u'_0, x \in \Omega_1 \setminus [-b, 0]; -u_1 = u'_0, x \in \Omega_2 \setminus [0, b]; \\ &\quad u_1 = u_0 = 0, x \in \Omega_3 \cup (-b, b)\}, b > 0. \end{aligned}$$

В этом случае в выражении для определителя матрицы рассеяния появится $\exp(2ikb)$, а пространство $L_2(\Omega_3)$ будет заменено на $L_2(\Omega_3 \cup (-b, b))$. Условие 2 теоремы 4.1 будет нарушено. Таким образом получаем, что система резонансных состояний будет полна в $L_2(\Omega_3)$ и не полна в $L_2(\Omega_3 \cup (-b, b))$ при $b > 0$. Что и требовалось доказать.

Области возможного использования результатов проекта

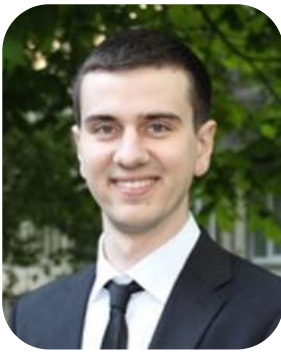
Основным результатом проекта является проверка полноты системы резонансных состояний в L_2 для квантового графа типа «дерево». Доказаны соответствующие теоремы. Основное приложение исследований в области квантовых графов – в нанoeлектронике (на графах удобно моделировать поведение квантовых систем). Многие задачи на квантовых графах требуют разложения по полным системам функций. Поэтому вопрос полноты чрезвычайно важен для приложений, в частности – в квантовой физике. Второе важное приложение результатов проекта относится к функциональному анализу. Задача факторизации внутренних функций, достаточно хорошо исследованная в скалярном случае, для оператор-функций представляет серьезную проблему. Проблема полноты резонансных состояний для квантового графа приводит к задаче факторизации матрицы-функции, которая, с одной стороны, допускает подробный анализ, а с другой – позволяет выявить черты общей задачи о факторизации оператор-функции. Таким образом, результаты выполнения проекта расширяют набор инструментов для выявления общих закономерностей, а также дают тестовую модель для проверки общих гипотез.

Публикации

1. *Popov A.I., Blinova I.V., Popov I.Y.* Discrete spectrum for quantum graph with local disturbance of the periodicity // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 661. P. 012024.
2. *Popov A.I., Adamyan V.M., Blinova I.V., Popov I.Y.* Waveguide bands for a system of macromolecules // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2015. Vol. 6. No 5. P. 611–617.
3. *Попов А.И.* Исследование разрешимости задачи Штурма – Лиувилля при построении асимптотического ряда // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 5. С. 916–920.
4. *Popov A.I., Popov I.Y., Lobanov I.S., Gerya T.V.* On the Stokes flow computation algorithm based on Woodbury formula // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2015. Vol. 6. No 1. P. 140–145.
5. *Popov A. I., Popov I.Y., Popov S.I., Lobanov I.S., Gerya T.V.* Practical analytical solutions for benchmarking of 2-D and 3-D geodynamic Stokes problems with variable viscosity // *Solid Earth*. 2014. Vol. 5. No 1. P. 461–476.
6. *Popov A.I., Popov I.Y., Lobanov I.S., Gerya T.V.* Benchmark solutions for nanoflows // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2014. Vol. 5. No 2. P. 391–399.
7. *Popov A.I., Popov I.Y., Lobanov I.S., Gerya T.V.* Numerical approach to the Stokes problem with high contrasts in viscosity // *Applied Mathematics and Computation*. 2014. Vol. 235. P. 17–25.
8. *Popov A.I., Popov I.Y., Lobanov I.S., Popov S.I., Gerya T.V.* Practical analytical solutions for benchmarking of 2-D and 3-D geodynamic Stokes problems with variable viscosity [Electronic resource] // *Solid Earth Discussions*. 2013. Vol. 5. P. 2203–2281. URL: <http://www.solid-earth-discuss.net/5/2203/2013/sed-5-2203-2013.pdf> (accessed: 09.12.2013).
9. *Popov A.I.* High frequency wave packet concentrated near the moving line on the liquid surface // *Journal of Physics: Conference Series*. 2013. Vol. 435. P. 012023.
10. *Popov A.I.* Wave walls for waves on the surface of a heavy liquid // *Journal of Mathematical Sciences*. 2013. Vol. 194. No 1. P. 83–97.
11. *Popov A.I.* Wave wall type solution for liquid surface waves // *AIP Conference Proceedings*. 2012. Vol. 1479. P. 728–731.
12. *Babich V.M., Popov A.I.* An asymptotic solution of the Hamilton – Jacobi equation concentrated near a surface // *Journal of Mathematical Sciences*. 2012. Vol. 185. No 4. P. 523–525.
13. *Попов А.И.* Волновые валы для волн на поверхности тяжелой жидкости // *Записки научных семинаров ПОМИ*. 2012. Т. 409. С. 151–175.
14. *Babich V.M., Popov A.I.* Quasiphotons of waves on the surface of a heavy liquid // *Journal of Mathematical Sciences*. 2011. Vol. 173. No 3. P. 243–253.
15. *Бабич В.М., Попов А.И.* Асимптотическое решение уравнения Гамильтона – Якоби, сосредоточенное вблизи поверхности // *Записки научных семинаров ПОМИ*. 2011. Т. 393. С. 23–28.
16. *Бабич В.М., Попов А.И.* Квазифотоны волн на поверхности тяжелой жидкости // *Записки научных семинаров ПОМИ*. 2010. Т. 379. С. 5–23.

Литература

1. *Lax P.D., Phillips R.S.* Scattering theory. New York, 1967. – 276 p.
2. *Lax P.D., Phillips R.S.* Scattering theory for automorphic functions. Princeton, 1976. – 300 p.
3. *Khrushchev S.V. et al.* Unconditional bases of exponentials and of reproducing kernels // *Complex Analysis and Spectral Theory*. Leningrad, 1979–1980. P. 214–335.



Посевкин Руслан Владимирович
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра вычислительной техники
E-mail: rus_posevkin@mail.ru

РАЗРАБОТКА ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДИАЛОГОВОЙ СИСТЕМЫ ДОСТУПА К БАЗЕ ДАННЫХ

Р.В. Посевкин

Научный руководитель – доцент И.А. Бессмертный

На сегодняшний день в мире существует множество программных систем. Еще больше разработано принципов взаимодействия с ними. Их разнообразие приводит к увеличению времени на обучение работы с системой и, как следствие, затрудняет свободное ее использование. Перспективным в данной ситуации является применение более привычного для пользователя естественного языка.

Данное решение обладает рядом преимуществ:

- минимальной подготовкой пользователя для работы с системой;
- простотой и высокой скоростью задания произвольных запросов к системе.

Простота при работе с естественно-языковым интерфейсом достигается путем применения пользователем языка, используемого в ежедневной коммуникации. Пользователи интернета пытаются найти ответы на вопросы с помощью поисковых машин и форумов. В интернете они уже есть, вопрос только в том, насколько быстро может быть получен этот ответ.

Для решения подобной проблемы используется естественно-языковой интерфейс в составе диалоговой системы.

Поиск знаний, в отличие от простого поиска информации, требует учета семантики запросов. Для естественно-языкового пользовательского интерфейса вопросно-ответных систем можно также использовать ограниченную лексику и грамматику языка. При этом не происходит серьезного ухудшения функциональности и производительности вопросно-ответной системы.

Ограниченный естественный язык – это подмножество естественного языка, текст на котором успешно воспринимается носителем полного естественного языка без приложения дополнительных усилий.

Не требуется дополнительного изучения ограниченной версии языка для составления текстов. Лексика и грамматика данного языка сильно упрощена, что позволяет сократить время анализа естественно-языковых элементов в вопросно-ответной системе, а также избежать неоднозначностей на лингвистическом уровне.

Цикл работы естественно-языкового интерфейса начинается с ввода пользователем сообщения на естественном языке, по которому строится его формальное описание. Все предшествующие результаты анализа используются при анализе последующих запросов, что позволяет системе сохранять ход диалога с пользователем и разрешать спорные моменты, связанные с применением одних и тех же терминов в разных предметных областях [1].

В процессе обработки естественно-языкового текста происходит последовательное выполнение его морфологического, синтаксического и семантического анализов (рис. 1).

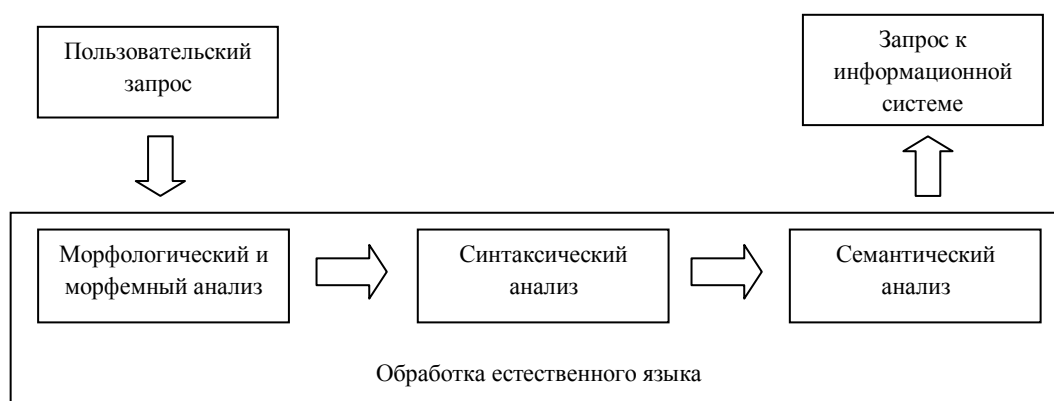


Рис. 1. Схема обработки естественно-языкового текста

Первым этапом обработки пользовательского запроса является морфологический и морфемный анализы. На данном этапе для каждого слова в формальной записи предложения строятся отношения, которые задают соответствия для значений грамматических категорий [2].

В результате морфологического анализа определяются морфологические характеристики каждого слова, такие как падеж, склонение, часть речи и другие. Количество и наличие морфологических характеристик слов, а также допустимых значений зависят от конкретного языка. Однако некоторые характеристики (например, часть речи) существуют во многих языках. Для проведения процедуры морфологического анализа текста существует три подхода: четкая и нечеткая морфологии, а также вероятностный подход.

При обработке естественно-языковых (ЕЯ) текстов на русском языке наиболее часто применяется подход, основанный на четкой морфологии, который базируется на словаре Зализняка [3].

В этом словаре описаны основные словоформы для русскоязычных слов. Каждой из них ставится в соответствие определенный код. Существует некая система правил, в соответствии с которой для данного слова можно построить все остальные формы. При этом в качестве исходных данных используется начальная словоформа и соответствующий ей код. В случае использования четкого подхода в процессе морфологического анализа необходимо иметь в наличии словарь всех словоформ и слов для данного языка. На вход в такой словарь поступает словоформа, а на выходе даются ее морфологические характеристики. Возможно построение словаря на основе словаря Зализняка по следующему алгоритму.

На первом этапе происходит перебор всех слов, содержащихся в словаре. Для каждого из них необходимо определить все возможные словоформы, которые затем сохраняются в формируемом словаре. В процессе проведения морфологического анализа конкретного слова достаточно найти его в словаре. В результате будут получены точные значения всех его морфологических характеристик.

При морфемном анализе определяются конкретные морфемы в рамках каждого слова: приставка, корень, суффикс, окончание. В словаре морфем русского языка [4, 5] для каждого слова указано разделение на составные части, однако не определяются типы каждой из них. Поэтому достоверно не известно, какая из частей является корнем, а какая суффиксом.

При этом совокупность всех возможных корней слов русского языка представляет собой открытое множество. В то же время множество всех приставок, суффиксов и окончаний ограничено. Также известен порядок следования морфем в составе слова: сначала идут приставки, затем корни, далее суффиксы и окончания. Таким образом, с помощью словаря морфем русского языка можно построить словарь, содержащий как разбиение слова на составные части, так и определение типа каждой из морфем. В результате

для проведения морфемного анализа слова достаточно просто обратиться к разработанному словарю.

Однако этого может быть недостаточно. В ситуации, когда слово отсутствует в словаре, возможно непосредственное проведение анализа на основе стандартного строения слов русского языка (приставка – корень – суффикс – окончание) и множества всех приставок, суффиксов и окончаний [6].

На этапе синтаксического анализа внутри предложения определяются отношения синтаксических связей. Выявляются главные и второстепенные члены предложения, определяется тип предложения и т. д. Синтаксический анализ выполняется поэтапно: при описании формальной структуры предложения используется информация, которая была получена ранее на этапе морфологического анализа. При этом применяются лексические и синтаксические правила анализируемого языка.

Этап семантического анализа представляет наиболее сложную часть обработки естественно-языкового текста. Его можно представить как обработку семантической сети, которая отражает результат анализа на предыдущих этапах, присутствующих в системе знаний о предметной области и языке программной системы. На данном этапе анализируются соотношения лингвистической конструкции и тех конструкций, которые хранятся в памяти системы для выявления отношений соответствия.

В процессе построения семантической модели слова учитывается его многозначность. Смысл слова рассматривается как некоторое множество различных значений, каждое из которых или вся совокупность в целом реализуется в определенном контексте. Результатом семантического анализа является конструкция запроса к информационной системе.

Заключение

В рамках исследования описана процедура обработки естественно-языкового текста на русском языке. В результате создан прототип программной системы, реализующей естественно-языковой пользовательский интерфейс к структурированному источнику данных. Данная система может применяться в областях, где требуется обеспечить доступ пользователя к информации из определенной предметной области. Например, возможно реализовать естественно-языковой интерфейс для аналитической системы. Введя запрос на естественном языке, пользователь получает отчет, выборку по данным за определенный временной период.

Публикации

1. *Посевкин Р.В., Бессмертный И.А.* Естественно-языковой пользовательский интерфейс диалоговой системы // Программные продукты и системы. 2016. № 3. С. 5–9.
2. *Посевкин Р.В.* Методология реализации естественно-языкового пользовательского интерфейса // Молодой ученый. 2016. № 10. С. 84–86.
3. *Посевкин Р.В.* Естественно-языковой пользовательский интерфейс // Материалы XVII Международной ежегодной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов и студентов «Наука. Университет 2016». Новосибирск, 2016. С. 162–164.
4. *Посевкин Р.В.* Модели, методы и программные средства реализации естественно-языкового интерфейса к структурированным источникам данных // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Челябинск, 2016. С. 508–514.
5. *Посевкин Р.В.* Обработка естественного языка в процессе разработки пользовательского интерфейса // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сборник научных трудов III Международной научной конференции «Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине». Ч. 1. Томск, 2016. С. 471–472.

6. *Посевкин Р.В.* Модели и методы реализации естественно-языкового пользовательского интерфейса // Молодежные исследования и инициативы в науке, образовании, культуре, политике: сборник материалов XI региональной молодежной научно-практической конференции. Биробиджан, 2016. С. 51–53.
7. *Posevkin R.V., Bessmertny I.A.* Translation of natural language queries to structured data sources // 9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT). 2015. P. 57–59.
8. *Посевкин Р.В.* Естественно-языковой интерфейс как элемент пользовательского взаимодействия [Электронный ресурс] // Электронный периодический научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2015. № 19. С. 213–217. URL: www.sci-article.ru/number/03_2015.pdf (дата обращения: 08.04.2017).

Литература

1. *Житко В.А.* Пользовательский интерфейс интеллектуальных вопросно-ответных системы // NB: Кибернетика и программирование. 2012. № 1. С. 23–30.
2. *Крайванова В.А.* Модель естественно-языкового интерфейса для систем управления сложными техническими объектами и оценка эффективности алгоритмов на ее основе [Электронный ресурс] // Управление большими системами: сборник трудов. 2009. № 26. URL: www.cyberleninka.ru/article/n/model-estestvenno-yazykovogo-interfeysa-dlya-sistem-upravleniya-slozhnymi-tehnicheskimi-obektami-i-otsenka-effektivnosti-algoritmov-na (дата обращения: 16.01.2015).
3. *Зализняк А.А.* Грамматический словарь русского языка. Словоизменение. 3-е изд. М., 1987. – 720 с.
4. *Кузнецова А.И., Ефремова Т.Ф.* Словарь морфем русского языка. М., 1986. – 1136 с..
5. *Тихонов А.Н.* Морфемно-орфографический словарь. М., 2002. – 704 с.
6. *Селезнев К.Е.* Обработка текстов на естественном языке [Электронный ресурс] // Открытые системы. 2003. № 12. URL: www.osp.ru/os/2003/12/183694/ (дата обращения: 08.04.2017).



Путин Евгений Олегович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: putin.evgeny@gmail.com

ВЫДЕЛЕНИЕ БИОМАРКЕРОВ СТАРЕНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА БИОХИМИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ КРОВИ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОМ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е.О. Путин

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Старение – сложный процесс, затрагивающий все биологические системы на всех уровнях организации [1, 2]. Одна из важнейших проблем заключается в том, что оценка

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

возрастных изменений и возможных антивозрастных средств требуют всеобъемлющего набора надежных биомаркеров старения [3].

Большинство из них не являются репрезентативными состояниями здоровья всего организма или отдельных систем, их сложно измерить. Общий биохимический анализ крови является одним из самых простых тестов, используемых врачами, чтобы проверить состояние здоровья пациентов [4, 5].

Цель данного проекта – предложить и разработать алгоритмы машинного обучения по выделению биомаркеров старения, основанных на биохимическом анализе крови, осуществляемом с использованием техник машинного обучения. Выделение биомаркеров будет проводиться на основе точности моделей машинного обучения, построенных для предсказания хронологического возраста человека.

Для достижения поставленной цели были решены следующие промежуточные задачи:

- собрана и проведена предобработка данных по биохимии крови с привязкой к хронологическому возрасту;
- проведены исследования по выбору и выделению признаков, а также сокращению размерности биомаркеров старения;
- проведены исследования по подбору оптимальной модели машинного обучения для выделения биомаркеров старения;
- разработан и описан способ оценки эффективности выбранного множества биомаркеров.

В проекте используются специальные данные – стандартизированные биохимические анализы людей с привязкой к их хронологическому возрасту. Такие анонимизированные статистические данные были получены в независимой российской лаборатории «Инвитро». Было предоставлено 62 419 отчетов (примеров), причем в каждом указаны 46 показателей биохимии человека (таких как глюкоза, холестерин, альбумин, мочевины и т. д.) и хронологического возраста пациента.

В ходе исследования данных было обнаружено, что людей, имеющих все 46 биохимических показателей в диапазонах референсных (допустимых) значений нет. Поэтому из 46 биохимических показателей были удалены пять, которые наиболее часто принимают не референсные значения, а именно: базофилы, эозинофилы, лимфоциты, моноциты и нейтрофилы.

Далее для тренировки моделей машинного обучения данные были разбиты на тренировочное и тестовое множества в соотношении 90/10. Их размеры составили соответственно 56 177 и 6 242 примеров. Также специально для этой процедуры данные были стандартизированы в диапазон 0-1 по формуле:

$$X_{0-1} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}},$$

где X – оригинальные значения каждого биохимического маркера, X_{min} и X_{max} – минимальное и максимальное его значения соответственно.

Все эксперименты проводились на графических процессорных устройствах (ГПУ, GPU) Nvidia Tesla K80. Для разрешения проблемы переобучения при построении каждой математической модели использовалась стандартная техника де-факто – полный скользящий контроль (*complete k-fold cross-validation*, кросс-валидация). В данной работе применялась кросс-валидация с пятью шагами. Для всех моделей были подобраны их оптимальные гиперпараметры. В качестве метрики оценки качества моделей машинного обучения был выбран коэффициент детерминации. В работе выделялись десять основных биохимических показателей.

Подбор оптимальной модели машинного обучения для данной задачи производился из следующих вариантов: линейная регрессия [6], *ElasticNet* [6], *k*-ближайших соседей [7],

деревья решений [7], случайный лес [6], градиентный бустинг [8], глубокие нейронные сети (многослойные перцептроны) [6, 7].

В работе рассматриваются все самые передовые методы по выбору и извлечению признаков, сокращению размерности, а именно: корреляция Пирсона, Спирмена, *ReliefF*, случайный лес, градиентный бустинг, глубокие нейронные сети, линейная регрессия, метод главных компонент [6].

В первую очередь были построены модели машинного обучения на 41-м биохимическом параметре. График, отражающий итоговую точность, приведен на рис. 1.

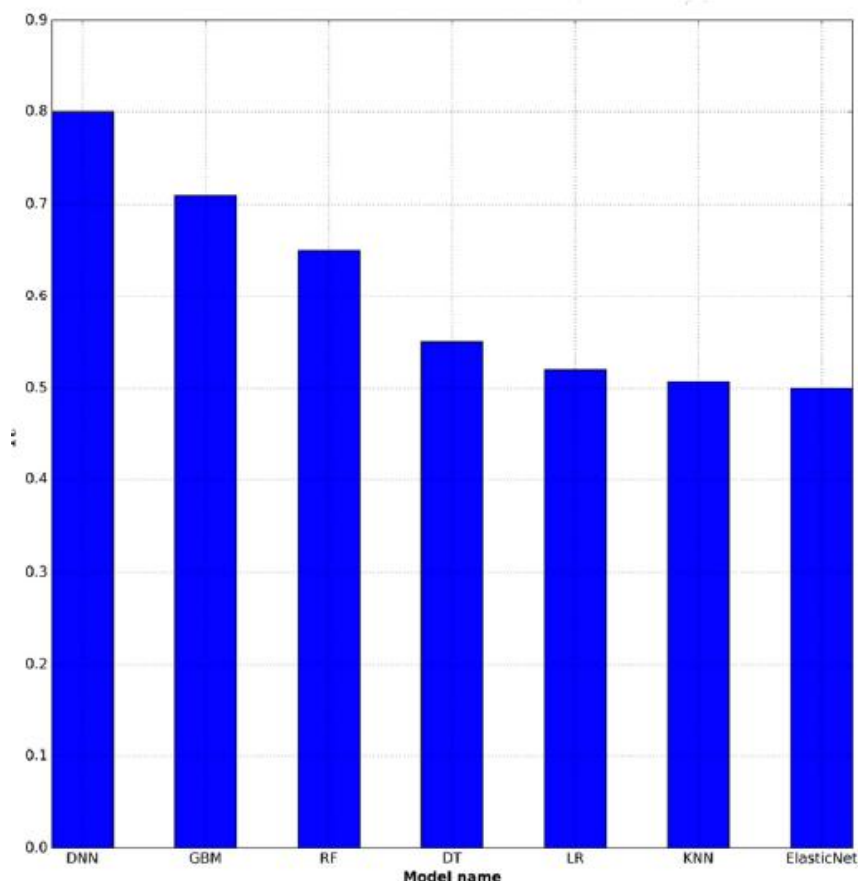


Рис. 1. График общей точности моделей машинного обучения на всех имеющихся биохимических показателях

На рис. 1. видно, что лучшей оказалась модель *DNN*, которая на валидационном множестве по коэффициенту детерминации дает значение 0,8. Основные результаты по выделению десяти биохимических маркеров старения по всем приведенными выше методам представлены в Таблице.

У лучшей модели *DNN* следующие гиперпараметры: четыре скрытых слоя нейронов в каждом 2 000, 1 500, 1 000, 500 нейронов соответственно; выход сети – один регрессионный нейрон; *AdaDelta* [9] как оптимизатор; *MSE* как функция потерь. Кроме того, используется *Dropout* [10] с вероятностью 0,5 в качестве параметра регуляризации сети.

Таким образом, методом *DNN* были выделены десять наиболее важных биохимических показателей, влияющих на процесс старения (в порядке важности): альбумин, глюкоза, фосфатаза щелочная, эритроциты, мочевины, альфа-2-глобулины, *RDW*, гематокрит, лимфоциты в процентах и холестерин.

На рис. 2. показаны значения относительной важности всех биохимических показателей, полученные согласно методу *DNN PFI*.

Таблица

Результаты построения моделей (столбцы) по выделенным десяти оригинальным биохимическим показателям для алгоритмов выбора признаков. Жирным шрифтом указаны лучшие значения на каждый конкретный метод выбора признака

	LR	ElasticNet	kNN	DT	RF	GBM	DNN
LR	0,39	0,41	0,42	0,42	0,44	0,44	0,42
ElasticNet	0,40	0,41	0,42	0,41	0,44	0,45	0,42
Pearson	0,35	0,36	0,39	0,40	0,41	0,41	0,39
Spearman	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,41
ReliefF	0,45	0,46	0,46	0,47	0,50	0,51	0,49
DNN	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,62
PCA	0,44	0,45	0,47	0,48	0,51	0,49	0,50
RF	0,40	0,41	0,41	0,49	0,53	0,52	0,50
GBM	0,40	0,41	0,42	0,48	0,52	0,54	0,50

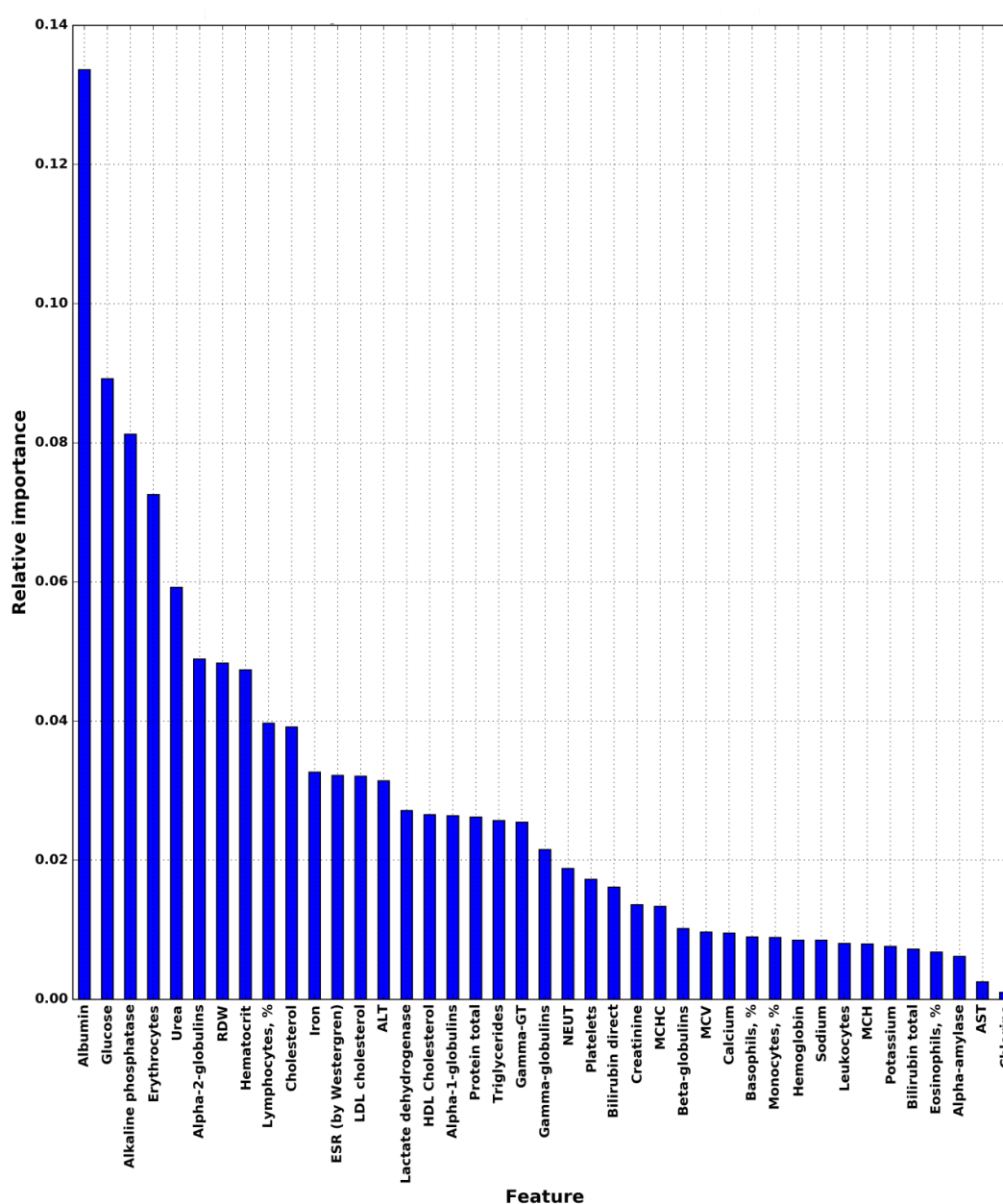


Рис. 2. Значения относительной важности каждого биохимического показателя, определенные по методу DNN PFI

Интересным биологическим выводом из данной работы является то, что альбумин, который главным образом управляет онкотическим давлением крови, играет важную роль в процессе старения. Так в работе [11] показано, что содержание его в крови в процессе старения снижается и связано с саркопенией. Вторым по относительной значимости маркером старения является глюкоза, которая имеет непосредственное отношение к метоболическому здоровью. Сердечно-сосудистые заболевания, связанные с сахарным диабетом, являются основными причинами смерти населения в целом [12]. Таким образом, выделенные биохимические маркеры действительно влияют на процессы старения и имеют существенную биологическую интерпретацию.

Публикации

Putin E.O., Mamoshina P.O., Aliper A.M., Korzinkin M.B., Moskalev A.A., Kolosov A.N., Ostrovskiy A.B., Cantor C.R., Vijg J., Zhavoronkov A.I. Deep biomarkers of human aging: Application of deep neural networks to biomarker development // *Aging* (Albany NY). 2016. Vol. 8. No 5. P. 1021–1033.

Литература

1. *Zhavoronkov A.I., Cantor C.R.* Methods for structuring scientific knowledge from many areas related to aging research // *PloS One*. 2011. Vol. 6. No 7. P. E22597.
2. *Moskalev A.A. et al.* Aging Chart: a community resource for rapid exploratory pathway analysis of age-related processes // *Nucleic Acids Research*. 2016. Vol. 44. No D1. P. D894–D899.
3. *Zhavoronkov A.I., Bhullar B.* Classifying aging as a disease in the context of ICD-11 // *Frontiers in Genetics*. 2015. Vol. 6. P. 326.
4. *Peterson K.* Biomarkers for alcohol use and abuse – a summary // *Alcohol Research and Health*. 2004. Vol. 28. No 1. P. 30.
5. *Libbrecht M.W., Noble W.S.* Machine learning applications in genetics and genomics // *Nature Reviews Genetics*. 2015. Vol. 16. No 6. P. 321–332.
6. *Friedman J. et al.* The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction. Springer, 2001. – 745 p.
7. *Mitchell T.M. et al.* Machine learning. WCB, 1997. – 432 p.
8. *Friedman J.H.* Greedy function approximation: a gradient boosting machine // *Annals of Statistics*. 2001. Vol. 29. No 5. P. 1189–1232.
9. *Zeiler M.D.* ADADELTA: an adaptive learning rate method [Electronic resource] // Cornell University Library [Official website]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1212.5701.pdf> (accessed: 22.12.12).
10. *Srivastava N. et al.* Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting // *Journal of Machine Learning Research*. 2014. Vol. 15. No 1. P. 1929–1958.
11. *Visser M. et al.* Lower serum albumin concentration and change in muscle mass: the Health, Aging and Body Composition Study // *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2005. Vol. 82. No 3. P. 531–537.
12. Health in 2015: from MDGs, Millennium Development Goals to SDGs, Sustainable Development Goals / T. Boerma, C. Mathers et al. World Health Organization, 2015. – 216 p.



Сергеев Максим Михайлович
Факультет лазерной и световой инженерии
Кафедра лазерных технологий и систем
E-mail: mmsergeev@corp.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ФОТОХРОМНЫХ СТЕКОЛ

М.М. Сергеев

Научный руководитель – профессор В.П. Вейко

Цель работы – изучение механизмов лазерно-индуцированной модификации структуры в объеме фотохромного пористого стекла, а также исследование кинетики формирования локально модифицированных областей.

Введение

Фотонные интегральные микросистемы, а также микроаналитические устройства активно развиваются и совершенствуются в настоящее время [1]. Основными достоинствами таких систем становятся компактность, многофункциональность и производительность. В частности, для создания микросистем подобного рода может быть использовано силикатное пористое стекло [2]. Его состав соответствует составу плавленого кварца, однако его нанопористая разветвленная структура обеспечивает ему отличительные физико-химические свойства. К одному из них можно отнести высокую адсорбционную способность, которая делает пористое стекло отличной матрицей для изготовления стеклообразных композиционных материалов, обладающих различными свойствами. В зависимости от условий импрегнирования подобные материалы могут обладать исключительными фоточувствительными [3], ферроэлектрическими, мультиферроидными и другими свойствами.

В настоящей работе рассмотрен механизм изменения структуры и оптических свойств пористых стекол, импрегнированных галогенидами серебра, – фотохромных пористых стекол (ФХПС) – под действием лазерного излучения ближнего ИК-диапазона. Причиной локальной модификации структуры ФХПС является лазерное уплотнение пористой матрицы стекла в области перетяжки пучка. Наличие наночастиц металлов в стекле обеспечивает частичное поглощение лазерного излучения и становится причиной возникновения теплофизических процессов модификации структуры материала. Под действием лазерного излучения происходят диффузионные процессы кластеризации и разрушения кластеров серебра в зависимости от режима облучения. Изучена кинетика процесса формирования областей модификации ФХПС, а также исследованы их оптические характеристики.

Эксперимент

В исследовании использовались пластины пористого стекла, импрегнированные солями серебра и меди в разных концентрациях. В качестве заготовки использовались образцы пористого стекла (мас. %: $0,30\text{Na}_2\text{O}-3,14\text{B}_2\text{O}_3-0,11\text{Al}_2\text{O}_3-96,45\text{SiO}_2$) [3], которые пропитывали в водных растворах солей AgNO_3 и $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ с соотношением $\text{Ag}:\text{Cu}$, равным 10:1 или 7:1, а затем в растворе галоидных солей (NH_4Cl , KBr , KJ). В результате получали пластины ФХПС с содержанием (мас. %): $0,76\text{Ag}_2\text{O}-0,02\text{CuO}$ и $0,28\text{Ag}_2\text{O}-0,01\text{CuO}$. Также

для исследований были изготовлены образцы с повышенным содержанием серебра (мас.%): $1,22\text{Ag}_2\text{O}-0,04\text{CuO}$.

На следующем этапе пластины ФХПС подвергались лазерному облучению, при котором происходило формирование областей модификации в объеме стекла. Формирование областей различной формы происходило под действием непрерывного излучения Yb-волоконного лазера с $\lambda = 1,07$ мкм, расходимостью $\theta = 0,26$ мрад и диаметром выходного пучка 5 мм. В некоторых случаях использовались наносекундные импульсы волоконного Yb-лазера ИЛМИ-1-50 с параметрами излучения: $\tau = 100$ нс, $f = 50$ кГц, $\lambda = 1,070$ мкм. Размер и формы областей модификации определялись мощностью непрерывного излучения $P_n = 4-13$ Вт или лазерных импульсов $P_u = (3-7) \cdot 10^2$ Вт, а также длительностью воздействия (5–40 с) и размером перетяжки пучка, формируемой объективом с увеличением $\times 10$, $NA = 0,25$. Область перетяжки пучка располагалась на глубине 200–500 мкм от поверхности пластины ФХПС. При изменении структуры ФХПС мощность излучения, падающего (P_0) на нее и прошедшего сквозь (P_t), регистрировались измерителем оптической мощности Gentec Solo PE-2M. Температура поверхности образца в области воздействия регистрировалась в интервале 20–1500 °С с помощью ИК-камеры *Flip Titanium 520 M*. Спектры пропускания ФХПС, а также областей модификации были получены на микроскопе-спектрофотометре МСФУ-К Ю-30.54.072.

Основные результаты

Лазерная модификация структуры в объеме пластин ФХПС. Формирование локальных микрообластей осуществлялось под действием неподвижного лазерного пучка с плотностью мощности в области перетяжки $q_n = 6,3 \cdot 10^5 - 1,9 \cdot 10^6$ Вт/см² для непрерывного излучения и $q_{имп} = 6,1 \cdot 10^7 - 1,4 \cdot 10^8$ Вт/см² для наносекундных импульсов (рис. 1). Области модификации представляли собой микроструктуры в объеме ФХПС с измененными оптическими свойствами и сложным строением в виде центральной и краевой частей. Центральная часть области обладала меньшей оптической плотностью, чем необлученная пластина ФХПС. Краевая часть областей модификации представляла собой кольцевую структуру, оптические характеристики которой изменялись при смещении от центра. Причиной такого строения становятся процессы изменения структуры ФХПС, вызванные действием лазерного излучения [4]. Непрерывное лазерное излучение использовалось для создания модифицированных областей с размером более 50 мкм (рис. 1а, 1б, 1д, 1е). Для уменьшения размеров областей, вплоть до нескольких мкм, были использованы лазерные импульсы с длительностью 100 нс (рис. 1в, 1г, 1ж, 1з).

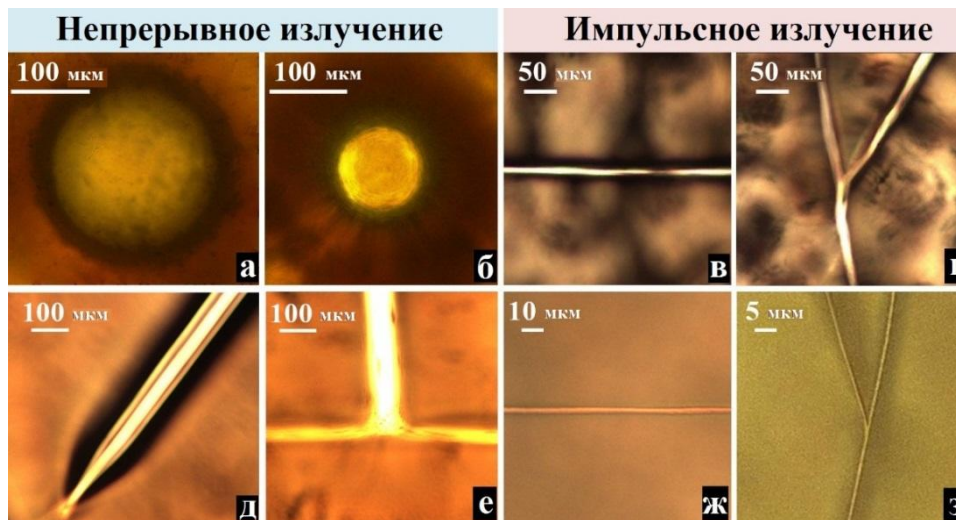


Рис. 1. Вид сформированных микрообластей различной формы в объеме пластин ФХПС с разным соотношением $\text{Ag}:\text{Cu}$: (а–д) 10:1 и (е–з) 7:1

Анализ термограмм и кривых мощности лазерного излучения, прошедшего сквозь область модификации (рис. 2), позволил изучить процессы изменения структуры ФХПС. Образцы обладали высокой поглотательной способностью в среднем и дальнем ИК-диапазоне, что не позволило регистрировать температуру в области перетяжки пучка, расположенной в объеме образца. Поэтому в экспериментах анализируются термограммы облучаемой поверхности ФХПС, позволяющие качественно оценить тепловые процессы, возникающие при формировании областей модификации. Пропускание в области модификации оценивалось по изменению прошедшего излучения, регистрируемого измерителем мощности (рис. 2).

Этап I (Формирование кластеров Ag). В первые секунды (1–3 с) после начала облучения происходило резкое повышение температуры и мощности прошедшего излучения, что свидетельствовало об интенсивном поглощении и, как следствие, нагреве пластины ФХПС в области воздействия. При этом поглощение осуществлялось на наночастицах серебра, которые, нагреваясь, становились «горячими» центрами и передавали накопленную теплоту матрице пористого стекла, нагревая ее. Подобный процесс локального нагрева аморфной матрицы хорошо известен и описан в работах по лазерной модификации оптических свойств многокомпонентных стекол, импрегнированных атомами металлов [5].

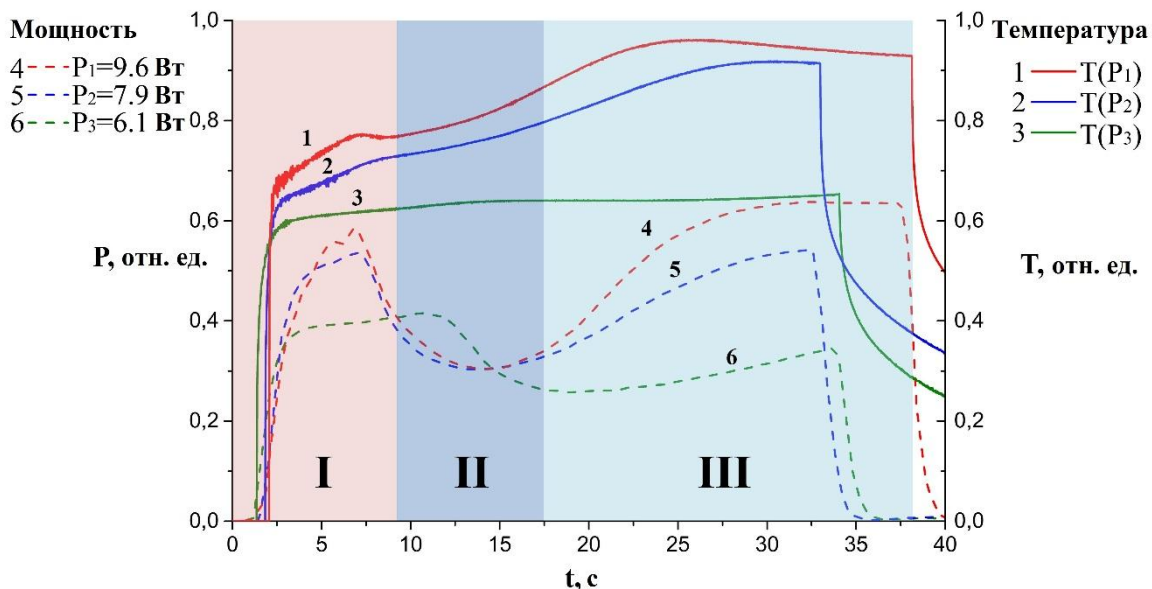


Рис. 2. Зависимости температуры поверхности ФХПС, а также мощности излучения, прошедшего сквозь ФХПС, от длительности облучения при различных значениях мощности падающего излучения в относительных величинах

Спустя 2,5–7 с после начала облучения в зависимости от мощности падающего излучения (P_0) на некоторое время стабилизировалось значение мощности прошедшего излучения (P_t). При значении $P_0 = 6,1$ Вт стабилизация прошедшей мощности происходила через 2,5 с от начала облучения и длилась около 10 с. Причиной этого было изменение структуры ФХПС и потемнение стекла. Процесс модификации сопровождался организацией и ростом кластеров серебра при концентрационной диффузии в поле лазерного излучения [6]. Формирование центров окраски и потемнение фотохромного стекла в зависимости от концентрации фоточувствительных компонент в его составе начинается при воздействии излучения с $q_{\text{умп}} \sim 10^3 - 10^4$ Вт/см². Для обесцвечивания стекла необходима интенсивность $q_{\text{умп}} \sim 10^5 - 10^6$ Вт/см², повышение которой в указанном диапазоне приводит к увеличению поглощения стекла вплоть до насыщения при $q_{\text{умп}} \sim 10^7$ Вт/см² [7].

Этап II (Нагрев матрицы пористого стекла кластерами Ag). Минимальное значение P_t достигалось спустя 10–17 с, что могло указывать на окончание процесса кластеризации серебра. При этом кластеры серебра продолжали поглощать лазерное излучение и отдавать

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

накопленное тепло матрице ФХПС, что становилось причиной ее спекания. Об этом свидетельствовал постепенный рост температуры. Длительность этой стадии формирования области модификации составляла 7–10 с для мощности падающего излучения в диапазоне значений 7,9–9,6 Вт.

Этап III (Уплотнение матрицы пористого стекла). Именно повышение P_t после 15–17 с от начала облучения и ее стабилизация в дальнейшем и указывали на начало обратного процесса – разрушения кластеров серебра, при котором происходило разрушение крупных частиц и повышение пропускания в центральной части области модификации [8]. Таким образом, наиболее крупные кластеры серебра сохранялись на периферии области модификации, создавая кольцевую структуру, которая опоясывала центральную часть области (рис. 1а, 1б). Наличие кластеров серебра и потемнение ФХПС на периферии областей модификации указывает на постепенное снижение температуры при смещении от центра (рис. 1а–1д). Здесь она могла быть меньше необходимой для спекания пористой силикатной матрицы. Вместе с этим каналы в этой части области модификации могут быть полностью заполнены частицами серебра, концентрация которого в краевой части области выше, чем в ее центральной части.

Из экспериментальных результатов, описанных ранее, можно предположить, что локальная модификация структуры в области перетяжки пучка связана как минимум с двумя процессами, протекающими одновременно при облучении. Одним из них является процесс концентрационной диффузии атомов серебра под действием излучения [9], приводящий к их массопереносу и организации в кластеры. Другим процессом, участвующим в формировании областей модификации, становилось уплотнение структуры ФХПС за счет локального нагревания матрицы стекла на центрах поглощения [5]. Для осуществления такой модификации необходима $q_{\text{умп}} \sim 10^7\text{--}10^8$ Вт/см², а сформированные области могут сохранять фотохромизм и плазмонный резонанс, однако их свойства отличаются от свойств исходного стекла.

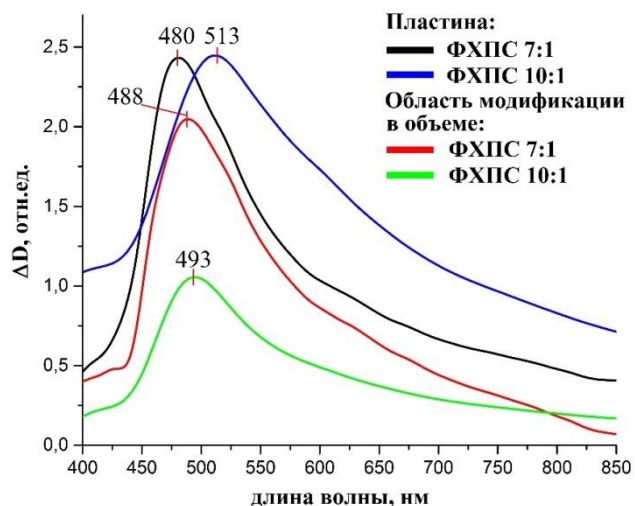


Рис. 3. Спектры оптической плотности пластины ФХПС с разным соотношением Ag:Si, равным 10:1 и 7:1, и областей модификации

Концентрация частиц серебра в составе ФХПС в значительной степени влияет на процессы локального изменения структуры и оптических свойств материала. При снижении концентрации серебра повышаются пороговые значения плотности мощности, уменьшается размер краевой части областей модификации вплоть до полного исчезновения (рис. 1ж, 1з). Снижение концентрации частиц серебра в пропитываемом растворе с 10:1 до 7:1 приводит к тому, что относительная оптическая плотность (ΔD) пластины ФХПС уменьшается в УФ- и ИК-области, а пиковое значение, соответствующее плазмонному резонансу, смещается с 509 нм до 485 нм (рис. 3). Более узкий пик ΔD пластины ФХПС с условием пропитки 7:1

указывает на меньшую дисперсию частиц по их размеру [9]. После лазерного облучения спектральные характеристики ФХПС изменились (рис. 3), однако сохранились пики, характерные для плазмонного резонанса частиц серебра, количества которых было достаточно для проявления эффекта.

Заключение

Перспектива применения ФХПС при лазерной обработке обусловлена, в первую очередь, относительно низким энергетическим порогом модификации структуры стекла, по сравнению с альтернативными методами обработки других оптически прозрачных материалов. Кроме того, ФХПС расширяют функциональность обычного пористого стекла и открывают возможность создания микроэлементной базы с различными свойствами: плазмонными, квантовыми, оптоэлектронными, фотохромными, феррооптическими.

Модификация оптических свойств и структуры в объеме ФХПС была реализована путем локального уплотнения силикатной матрицы при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1,07 мкм. Исследованы оптические характеристики стекла в зоне облучения. Обнаружено, что области локальной модификации в объеме ФХПС сохраняют способность к фотохромизму и плазмонному резонансу, при этом их свойства отличаются от свойств исходного стекла. Предложено описание процесса формирования микрообластей в объеме пластин ФХПС на основании механизма нагрева матрицы стекла на центрах поглощения в виде наночастиц серебра, поглощающих падающее излучение. Увеличение концентрации fotocувствительной компоненты в составе ФХПС в пять раз по сравнению с фотохромным стеклом приводит к снижению энергетических порогов формирования всех процессов (плотности мощности) на один-два порядка. Так, модификация структуры ФХПС осуществлялась при $I \sim 10^5\text{--}10^8$ Вт/см².

Публикации

1. *Sergeev M.M., Kostyuk G.K.* Laser-induced modification in the bulk of photochromic porous glass impregnated with silver halides // *Proceedings of SPIE*. 2013. Vol. 9065. P. 90650Q.
2. *Костюк Г.К., Сергеев М.М., Гирсова М.А., Яковлев Е.Б., Анфимова И.Н., Антропова Т.В.* Локальное лазерно-индуцированное изменение спектральных свойств в объеме фотохромных пористых силикатных стекол, легированных галогенидами серебра и меди // *Физика и химия стекла*. 2014. Т. 40. № 4. С. 551–557.
3. *Сергеев М.М., Костюк Г.К.* Лазерно-индуцированное формирование модифицированных областей протяженной формы в объеме пористого стекла, импрегнированного солями серебра // *Стекло и керамика*. 2014. № 4. С. 7–13.
4. *Veiko V.P., Sergeev M.M., Kostyuk G.K.* 3D laser structure modification of photochromic nanocomposites based on porous glass // *Journal of Laser Micro / Nanoengineering*. 2015. Vol. 10. No 1. P. 20–23.

Литература

1. *Sugioka K., Cheng Y.* Ultrafast laser processing: from micro-to nanoscale. CRC Press, 2013. – 597 p.
2. *Antropova T.V. et al.* Peculiarities of the fabrication process and the structure of porous membranes based on two-phase fluorine-and phosphorus-containing sodium borosilicate glasses // *Glass Physics and Chemistry*. 2015. Vol. 41. No 1. P. 14–25.
3. *Girsova M.A. et al.* Structure and optical properties of photochromic quartz-like glass doped with silver halides // *Glass Physics and Chemistry*. 2014. Vol. 40. No 2. P. 162–166.
4. *Сергеев М.М., Костюк Г.К.* Лазерно-индуцированное формирование модифицированных областей протяженной формы в объеме пористого стекла, импрегнированного солями серебра // *Стекло и керамика*. 2014. № 4. С. 7–13.

5. *Komatsu T.* Design and control of crystallization in oxide glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2015. Vol. 428. P. 156–175.
6. *Takami A. et al.* Laser-induced size reduction of noble metal particles // *The Journal of Physical Chemistry B*. 1999. Vol. 103. No 8. P. 1226–1232.
7. *Marquardt C. et al.* Darkening mechanisms in silver-halide photochromic glasses: Flash photolysis and ESR studies // *Journal of Applied Physics*. 1976. Vol. 47. No 11. P. 4915–4925.
8. *Capoen B. et al.* Laser-induced growth of nanocrystals embedded in porous materials // *Nanoscale Research Letters*. 2013. Vol. 8. No 1. P. 1–10.
9. *Sendova M., Jiménez J.A.* Plasmonic coupling in silver nanocomposite glasses // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012. Vol. 116. No 33. P. 17764–17772.



Скриплева Елена Александровна
Факультет пищевых технологий и инженерии
Кафедра прикладной биотехнологии
E-mail: 4ernamurka@rambler.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВА ЛЕЧЕБНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ЙОГУРТА, СНИЖАЮЩЕГО РИСК ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Е.А. Скриплева

Научный руководитель – профессор Т.П. Арсеньева

Цель проекта – разработка состава йогурта, обогащенного селеном в органической форме с добавлением заменителей сахара.

В процессе выполнения проекта проводились экспериментальные исследования показателей качества созданного йогурта. Впервые разработан кисломолочный продукт, являющийся источником органического селена и способный снизить риск возникновения онкологических заболеваний.

По данным института питания РАМН, состояние здоровья населения может быть охарактеризовано следующими цифрами: здоровые люди – 20 %, люди с пониженным уровнем здоровья – 40–45 %, нездоровые и склонные к болезням – 30–35 % [1]. Из этого следует, что значительная часть населения России нуждается в специальном лечебно-профилактическом питании продуктами, обогащенными минеральными веществами, в первую очередь макроэлементами: кальцием, калием, натрием, йодом, селеном, фтором, цинком и железом [2].

В последние годы в России, особенно в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, возросло количество раковых заболеваний. За последние десять лет прирост заболевших онкологическими заболеваниями, по разным данным, составил около 15 %. По усредненным данным распространенности злокачественных опухолей в различных органах рак пищевода и желудка стоят на втором месте [3].

Одним из существенных способов профилактики злокачественных новообразований является прием селена [4]. По данным ученых Института питания РАМН, около 80 % населения России испытывает дефицит этого макроэлемента. Особенно часто он встречается

у пожилых людей в возрасте 45–55 лет и после 70-ти, у беременных женщин («селеновая яма») и детей, особенно после искусственного вскармливания [5]).

При дефиците селена снижается работоспособность, теряется ясность мышления, слабеет иммунитет; у людей, работающих на вредных производствах, очень быстро развиваются профессиональные заболевания; человек часто болеет простудами и кожными заболеваниями – возникают гнойники; плохо заживают раны и травмы; ухудшается зрение; у мужчин развивается импотенция [4, 6].

В результате экспериментальных исследований установлена доза внесения биодобавки «Селен Альга Плюс» в количестве 0,4 % от массы смеси, что соответствует 50 % нормы потребления селена в сутки при употреблении в пищу двухсот граммов продукта [7, 8].

Подобраны подсластители растительного происхождения. В качестве таковых были выбраны стевиозид и сироп топинамбура [9].

Цель данного исследования – разработка состава йогурта, обогащенного селеном в органической форме с добавлением заменителей сахара и наполнителей для улучшения потребительских характеристик продукта.

Были исследованы и опробованы такие наполнители, как цикорий, имбирь и корица.

На первом этапе эксперимента использовали цикорий. Для определения его дозы наполнитель вносили в продукт (с биодобавкой и подсластителями) в количестве от 0,5 до 2 % с шагом 0,25 %. В образцах определяли органолептические показатели – вкус и запах – по десятибалльной шкале (метод потребительской оценки с использованием гедонической шкалы). Оценка проводилась группой испытуемых из девяти человек – сотрудников и студентов кафедры технологии молока и пищевой биотехнологии. Требования к работе группы экспертов соответствовали ISO 8589 стандарт (2007). Участникам предлагалось оценить вкус и запах образцов, используя десятибалльную шкалу, определяя интенсивность показателя от слабо-ощутимого до ярко-выраженного.

На втором этапе исследований использовали имбирь. Его дозу варьировали в количестве от 0,1 до 1 % с шагом 0,1 %. Сухой порошок имбиря вносили в готовый йогурт и определяли в образцах органолептические показатели так же, как описано выше.

При подборе дозы корицы готовили образцы йогурта с дозировкой 0,1–0,4 % с шагом 0,1 %. В подготовленных образцах также определяли вкус и запах по десятибалльной шкале.

Определение количества вносимых с биодобавкой минеральных веществ и витаминов проводили в Лаборатории исследования пищевых продуктов, сырья и ядохимикатов, находящейся по адресу: 191025, Санкт-Петербург, ул. Стремянная, д. 19.

Влияние концентрации цикория на вкус и запах йогурта представлено в Табл. 1.

Таблица 1

Влияние концентрации цикория на показатели качества йогурта

Доза цикория, %	Органолептические показатели: вкус, запах
0,50	Кисломолочный аромат со слабым запахом биодобавки, сладкий вкус без горечи, запаха цикория не ощущается
0,75	Кисломолочный аромат со слабым запахом биодобавки, сладкий вкус, начинает ощущаться легкая горечь, запаха цикория не ощущается
1,00	Аромат цикория, сладкий вкус, ощущается легкая горечь
1,25	Аромат цикория, сладкий вкус, ощущается легкая горечь
1,50	Аромат цикория, горько-сладкий вкус
1,75	Аромат цикория, горько-сладкий вкус
2,00	Аромат цикория, горький вкус

К сожалению, как видно из данных таблицы, при дозе цикория 0,75 % его аромат еще не ощущается, а горечь уже присутствует. Следовательно, цикорий не выполняет своей

функции – заглушить запах биодобавки и придать йогурту приятный вкус и запах, повысив тем самым его потребительские свойства. Данный факт делает невозможным его использование в качестве наполнителя для нового продукта.

Влияние доз имбиря и корицы представлены в Табл. 2 и 3 соответственно.

Таблица 2

Влияние концентрации имбиря на показатели качества йогурта

Доза имбиря, %	Органолептические показатели: вкус, запах
0,1	Сладкий вкус с легкой приятной остринкой, запаха имбиря практически не ощущается
0,2	Сладкий вкус с легкой приятной остринкой, ощущается слабый запах имбиря
0,3	Сладкий вкус с легкой приятной остринкой, но через некоторое время послевкусие усиливается; ощущается слабый запах имбиря
0,4	Сладкий вкус с легкой остринкой, но через некоторое время послевкусие усиливается; ощущается приятный запах имбиря
0,5	Сладкий вкус с остротой неестественной для кисломолочного продукта, аромат имбиря
0,6	Сладкий вкус с остротой неестественной для кисломолочного продукта, ярко-выраженный аромат имбиря
0,7	Острый вкус, ярко-выраженный аромат имбиря
0,8	Острый вкус, ярко-выраженный аромат имбиря
0,9	Острый вкус, ярко-выраженный аромат имбиря
1,0	Острый вкус, ярко-выраженный аромат имбиря

Таблица 3

Влияние концентрации корицы на показатели качества йогурта

Доза корицы, %	Органолептические показатели – вкус, запах
0,1	Чистый кисломолочный, сладковатый, легкий привкус корицы, недостаточно выраженный аромат корицы
0,2	Чистый кисломолочный, сладковатый, ярко-выраженный аромат корицы, посторонних запахов не ощущается, легкий привкус корицы
0,3	Чистый кисломолочный, сладковатый, ярко-выраженный аромат корицы, посторонних запахов не ощущается, появляются легкая горечь и послевкусие
0,4	Чистый кисломолочный, сладковатый, ярко-выраженный аромат корицы, посторонних запахов не ощущается, появляются горечь и послевкусие

В соответствии с данными, представленными в Табл. 2 и 3, имбирь обладает слабым запахом и не способен заглушить запах биодобавки, но придает продукту пикантный чуть островатый вкус. Корица, напротив, обладая слабой вкусообразующей способностью, придает йогурту ярко-выраженный аромат и полностью маскирует запах биодобавки. Поэтому было решено скомбинировать корицу с имбирем в различных соотношениях. Балльная оценка образца со смесью имбиря и корицы в соотношении 1:1 представлена на рис. 1.

В соответствии с данными, представленными на рис. 1, наивысшее количество баллов получил образец с концентрацией смеси имбиря и корицы 0,2 % каждого наполнителя (смесь 1:1 в количестве 0,4 %). Такой продукт обладает чистым кисломолочным вкусом, сладким

с привкусом внесенного наполнителя, ярко-выраженным ароматом корицы, но без посторонних привкусов и запахов.

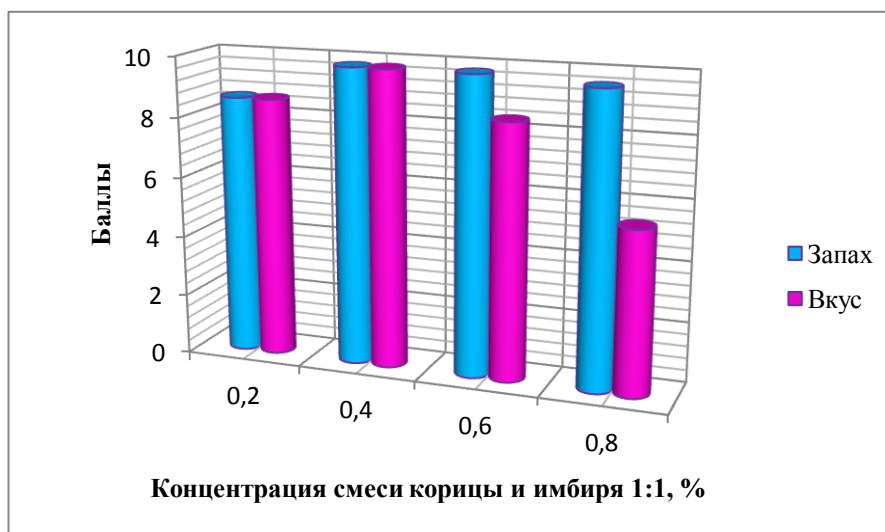


Рис. 1. Влияние концентрации смеси наполнителей на органолептические показатели йогурта

В результате проведенного исследования было установлено следующее содержание витаминов и минеральных веществ в йогурте, обогащенном биодобавкой «Селен Альга Плюс».

Таблица 4

Содержание витаминов и минеральных веществ в готовом продукте

Минеральные вещества и витамины	Содержание в готовом продукте
Витамины, мг/100 г съедобной части	
Витамин E, мг	3,840
Аскорбиновая кислота (витамин C), мг	2,050
Микроэлементы, мкг/100 г съедобной части	
Йод	25,6
Селен	16,9

По данным Табл. 4, можно утверждать, что новый продукт содержит повышенное количество (по сравнению с традиционным йогуртом) витамина C (удовлетворение суточной потребности на 4,6 %) и E (удовлетворение суточной потребности на 51,2 %).

Витамины E, C и селен вместе являются мощнейшими антиоксидантами. Витамин C улучшает всасывание селена, способствует стабилизации и восстановлению витамина E. Селен дополняет работу витамина E – вместе они создают полноценную ловушку для жирорастворимых оксидантов. Селен и витамин E действуют только совместно, так что прием одного требует дополнительный прием другого. Более того, дефицит витаминов E и C может помешать организму усвоить селен.

По данным Табл. 4 видно, что готовый продукт имеет более высокое количество (по сравнению с традиционным йогуртом) селена (удовлетворение суточной потребности на 56,3 %) и йода (удовлетворение суточной потребности на 34,1 %). В результате проведения исследований были подобраны наполнители – имбирь и корица, которые полностью маскируют привкус биодобавки и придают готовому продукту приятный запах корицы и островато-пикантный привкус имбиря.

Были определены дозы внесения имбиря и корицы. Добавление смеси наполнителей 1:1 в количестве 0,4 % позволило получить продукт с улучшенными потребительскими свойствами.

Исследована функциональная эффективность йогурта, обогащенного селеном. Коррекция его витаминного и минерального состава позволила создать новый продукт, способный повысить селеновый статус населения, а также снизить имеющийся дефицит йода и некоторых витаминов, присутствующий у более 50 % населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Получен новый вид функциональной и лечебной продукции, обладающей двойным спектром действия.

Во-первых, прием кисломолочных продуктов, обогащенных селеном в легкоусвояемой органической форме, уменьшает дефицит селена населения и снижает риск возникновения социально-значимых заболеваний, в том числе онкологических.

Во-вторых, ввиду отсутствия сахарозы и присутствия селена и топинамбура, которые способны дополнительно понижать уровень сахара в крови, получен продукт специального назначения, предназначенный не только для массового потребления, но и для людей, страдающих сахарным диабетом.

Публикации

1. *Arseneva T.P., Skripleva E.A.* Optimization of the recipe of yoghurt with additives and control of some quality attributes of new yoghurt recipe // *Agronomy Research*. 2015. Vol. 13. No 4. P. 1086–1096.
2. *Арсеньева Т.П., Скриплева Е.А.* Исследование и разработка йогурта обогащенного селеном в биодоступной форме [Электронный ресурс] // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2014. № 2 (20). URL: processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10796.pdf (дата обращения: 25.05.2016).
3. *Скриплева Е.А., Арсеньева Т.П.* Подбор закваски для йогурта, обогащенного селеном в легкоусвояемой форме // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2015. № 2-3. С. 46–50.
4. *Скриплева Е.А., Арсеньева Т.П.* Разработка технологии йогурта для людей страдающих сахарным диабетом // *Научный альманах «Вестник Торгово-технологического института»*. 2014. № 1. С. 51–55.
5. *Скриплева Е.А., Арсеньева Т.П.* Разработка технологии йогурта с использованием заменителя сахара «Стевии» // *VI Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»: материалы конференции*. СПб., 2013. С. 603–606.
6. *Скриплева Е.А.* Разработка технологии йогурта функционального назначения // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых*. Вып. 4. СПб., 2014. С. 159–160.
7. *Скриплева Е.А., Арсеньева Т.П.* Разработка состава функционального кисломолочного напитка, обладающего онкопротекторными свойствами // *Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства*. 2015. Т. 1. № 8. С. 787–790.
8. *Арсеньева Т.П., Скриплева Е.А.* Обогащение кисломолочного напитка селеном и йодом // *Материалы научно-практической конференции молодых ученых «Современные тенденции в развитии пищевой биотехнологии» в рамках международного проекта TEMPUS-DEFRUS*. СПб., 2013. С. 32–36.
9. *Скриплева Е.А., Арсеньева Т.П.* Подбор вкусовой составляющей для йогурта с онкопротекторными свойствами // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филипова*. 2015. № 4 (41). С. 100–105.

Литература

1. *Шевелева С.А.* Пробиотики, пребиотики и пробиотические продукты // *Вопросы питания*. 1999. № 2. С.32–39.

2. Волкотруб Л.П., Андропова Т.В. Роль селена в развитии и предупреждении заболеваний (обзор) // Гигиена и санитария. 2001. № 3. С. 57–61.
3. Свиридова С.П. и др. Возможности эссенциального селена в онкологии // Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН. 2012. Т. 23. № 3. С. 6–15.
4. Rayman M.P. The importance of selenium to human health // Lancet. 2000. Vol. 356. P. 233–241.
5. Гмошинский И.В., Мазо В.К. Минеральные вещества в питании человека. Селен: всасывание и биодоступность // Вопросы питания. 2006. Т. 75. № 5. С. 15–21.
6. Mehdi Y. et al. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions // Molecules. 2013. № 18. P. 3292–3311.
7. Скриплева Е.А., Арсеньева Т.П. Обогащение кисломолочного напитка селеном и йодом // Материалы научно-практической конференции молодых ученых «Современные тенденции в развитии пищевой биотехнологии» в рамках международного проекта TEMPUS-DEFRUS. СПб., 2013. С. 32–36.
8. Методические рекомендации МР 2.3.1.2432-08. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. М., 2008. – 41 с.
9. Шадилов Е.В. Идеальное питание. СПб., 2000. –160 с.



Сластихин Иван Александрович
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
Кафедра вычислительной техники
E-mail: stopgo89@gmail.com

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПОДДЕРЖКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ С ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ЗАПРОСОВ

И.А. Сластихин

Научный руководитель – профессор В.А. Богатырев

Введение

К современным вычислительным системам предъявляются высокие требования по безопасности, производительности, отказоустойчивости, функциональной и структурной надежности, достигаемые при резервировании ресурсов и их консолидации.

Для структурно избыточных компьютерных систем устойчивость вычислительного процесса (функциональная надежность) может поддерживаться при динамическом распределении запросов, в том числе при направлении резервных копий поступающих в систему запросов на обслуживание в несколько узлов (каждая копия выполняется отдельным узлом). Системотехническое проектирование систем обработки данных базируется на использовании математического аппарата теории массового обслуживания и теории надежности.

Современные вычислительные сети зачастую бывают распределенными, то есть включают в себя не только набор вычислительных узлов, но также среду коммуникации, Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

обеспечивающую обмен данными между ними. Кроме требований по надежности вычислений, к ним также предъявляются высокие требования по надежности передачи данных между вычислительными узлами.

Оценка среднего времени ожидания запросов в многоканальных системах с применением и без применения резервированного обслуживания запросов

Среднее время ожидания для многоканальных систем без резервированного обслуживания запросов типа $M/M/n$ вычисляется по известным формулам [1, 2]:

$$t = P_0 \frac{v}{n(1-\rho)},$$

где v – среднее время выполнения запроса, n – число обслуживающих приборов, $\rho = \lambda v / n$ – коэффициент загрузки системы; а вероятность того, что заявка попадет в очередь, определяется по следующему выражению:

$$P_0 = \frac{(n\rho)^n}{n!(1-\rho)} \left(\sum_{s=0}^{n-1} \frac{(n\rho)^s}{s!} + \frac{(n\rho)^n}{n!(1-\rho)} \right)^{-1}.$$

При резервировании запросов каждая его копия одновременно распределяется на выполнение в один из k приборов, при этом будем пренебрегать возможным разбросом времени выполнения копий запроса в разных приборах. Учитывая, что выполнение каждого запроса требует ресурсов k приборов, эффективная канальность рассматриваемой системы по обслуживанию разных запросов уменьшается с n до n/k каналов. Такое представление системы ограничено условием: n/k – целое число. Рассматривая процесс резервированного обслуживания k копий по обслуживанию одной копии в одном из k приборов, формулу для оценки среднего времени ожидания преобразуем к виду:

$$t_{\text{pez}} = P_{0_{\text{pez}}} \frac{vk}{n(1-\rho_{\text{pez}})},$$

где $\rho_{\text{pez}} = \frac{\lambda vk}{n}$, а вероятность того, что запрос попадет в очередь, определяется как:

$$P_{0_{\text{pez}}} = \frac{\left(\frac{n}{k}\rho_{\text{pez}}\right)^{\frac{n}{k}}}{\left(\frac{n}{k}\right)!(1-\rho_{\text{pez}})} \left(\sum_{s=0}^{\frac{n}{k}-1} \frac{\left(\frac{n}{k}\rho_{\text{pez}}\right)^s}{s!} + \frac{\left(\frac{n}{k}\rho_{\text{pez}}\right)^{\frac{n}{k}}}{\left(\frac{n}{k}\right)!(1-\rho_{\text{pez}})} \right)^{-1}.$$

На рис. 1 представлен график зависимости среднего времени ожидания от интенсивности поступления заявок. Расчет проведен в системе компьютерной математики *Mathcad-15* при числе обслуживающих приборов в системе $n = 8$ шт., среднем времени выполнения запроса $v = 1$ с, кратности резервированного обслуживания запросов $k = 1, 2, 4$.

Кривая 1 соответствует среднему времени ожидания с резервированным выполнением запросов при кратности резервирования $k = 4$, кривая 2 – при $k = 2$, а кривая 3 – при $k = 1$. Из представленного графика следует, что среднее время ожидания при резервировании запросов в условиях безошибочности вычислений возрастает.

Представленная оценка является верхней для резервированного обслуживания запросов, так как не учитывает возможность снижения среднего времени их-пребывания при резервированном обслуживании в результате того, что процесс обслуживания является вероятностным, а это может привести к тому, что в одном из каналов время выполнения копии может оказаться меньше, чем в других.

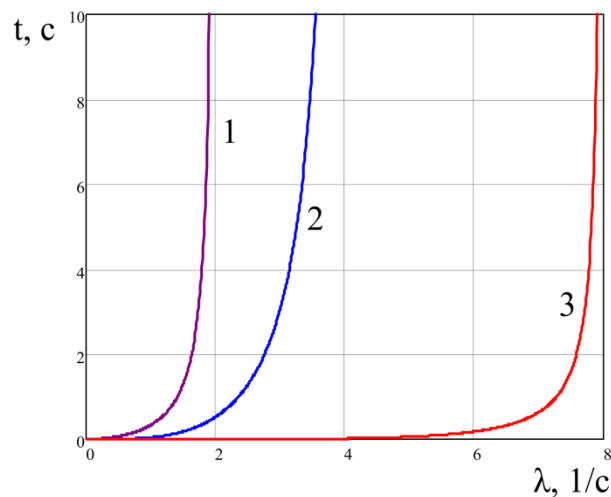


Рис. 1. Зависимость среднего времени ожидания от интенсивности поступления заявок λ

Эффективность резервированного обслуживания с учетом задержек обслуживания запросов в условиях ненадежности вычислений

Эффективность обслуживания запросов с учетом задержек обслуживания запросов и возможности их ошибочных выполнений оценим как:

$$b = (t_{\text{макс}} - t)P,$$

где $t_{\text{макс}}$ – максимально допустимое время ожидания запроса, t – среднее время ожидания запроса, P – вероятность безошибочного выполнения запроса, $(t_{\text{макс}} - t)$ – средний запас времени ожидания. Показатель b соответствует математическому ожиданию среднего запаса времени ожидания безошибочно выполняемых запросов.

Вероятность безошибочного нерезервированного выполнения запроса $P_{\text{нерез}} = e^{-\lambda_0 v}$, где λ_0 – суммарная интенсивность ошибок и отказов. Вероятность безошибочного выполнения резервированного запроса хотя бы в одном из k узлов, принимающих запрос к обслуживанию, вычисляется как:

$$P_{\text{рез}} = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 v})^k.$$

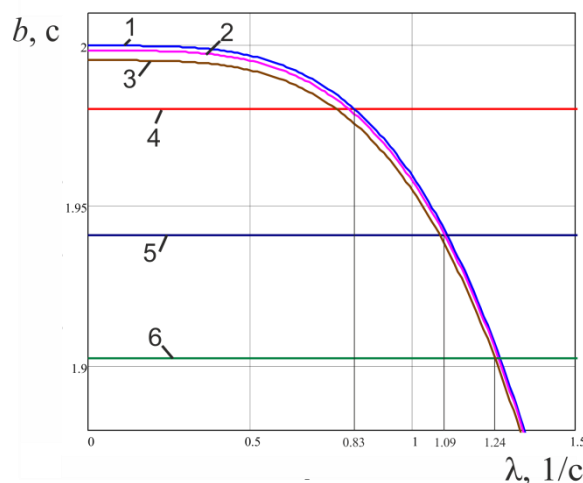


Рис. 2. Зависимость эффективности системы от интенсивности запросов λ

При интенсивности ошибок $\lambda_{01} = 10^{-2}$ 1/с, $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$ 1/с и $\lambda_{03} = 5 \times 10^{-2}$ 1/с кривые 1–3 соответствуют критерию эффективности системы b для резервированного обслуживания запросов ($k = 2$), а кривые 4–6 – без резервированного обслуживания. Расчеты показывают,

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

что резервирование запросов дает выигрыш в эффективности системы при небольшой интенсивности запросов (загрузке). Полученные зависимости позволяют найти границу целесообразности (эффективности) резервированного обслуживания запросов. Так, при интенсивности ошибок $\lambda_{02} = 3 \times 10^{-2}$ 1/с резервированное обслуживание запросов целесообразно для интенсивности запросов λ меньшей 1,09 1/с.

Из рис. 2 видно, что при росте интенсивности ошибок, границы эффективности резервирования запросов увеличиваются. Рост интенсивности запросов приводит к увеличению эффективности b при резервированном выполнении запросов. Таким образом, для повышения эффективности системы целесообразно адаптивное изменение кратности резервирования запросов в зависимости от интенсивности потока запросов.

Оценка влияния среднего времени пребывания запросов в одноканальной системе на резервированную передачу копий запросов

Установим влияние выбора кратности резервированной передачи через многоканальную среду на среднее время пребывания запросов на передачу пакетов в системе.

Будем считать заданными число магистралей в сети – m ; вероятность (интенсивность) битовых ошибок в магистрали B , среднюю битовую длину пакетов N , битовую скорость передачи по каналу L .

Среднее время передачи пакета по магистрали определим как: $V = N / L$.

Среднее время пребывания запросов при интерпретации процесса передачи через канал системой массового обслуживания типа $M/M/1$ [2]:

$$T = V / (1 - k\Lambda V / m),$$

где k – кратность резервирования передач (количество магистралей для резервированной передачи копий пакета), Λ – интенсивность запросов на передачу пакетов через сеть.

Приведем пример расчета среднего времени пребывания пакета в зависимости от кратности резервированной передачи копий пакетов при различных значениях загрузки. Расчет выполнен в системе компьютерной математики *Mathcad-15* при числе магистралей $m = 5$ шт.; среднем числе бит в пакете $N = 256$ бит; скорости передачи данных по магистрали $L = 100$ Мбит/с.

Зависимость среднего времени пребывания пакета от кратности резервированных передач копий пакетов представлена на рис. 3, на котором кривые 1–5 соответствуют среднему времени пребывания пакета при интенсивностях $\Lambda = 10^4$, 9×10^4 , 2×10^5 , $2,5 \times 10^5$, 3×10^5 1/с.

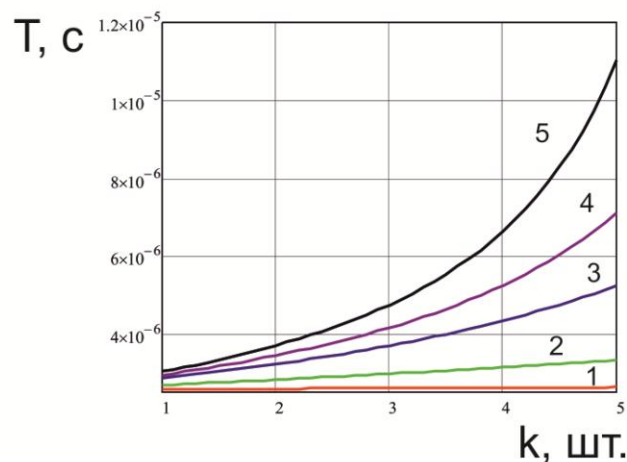


Рис. 3. Влияние среднего времени пребывания запросов на кратность резервированных передач копий пакетов

Из представленного рисунка видно, что при увеличении кратности резервирования передачи пакетов среднее время пребывания запросов на передачу пакетов в сети растет. При этом чем больше интенсивность запросов на передачу пакетов, тем больше время их пребывания при использовании резервированной передачи.

Векторная оценка эффективности резервированной передачи

Вероятность ошибки при передаче пакета по одной магистрали определим как $p = (1 - B)^N$. Вероятность успешной доставки пакетов по k магистралям с посылкой по каждой из них резервной копии пакета при условии, что передача считается успешной, если безошибочно доставлена хотя бы одна копия пакета, определим как $P = 1 - (1 - p)^k$.

Для решения задачи векторного выбора проектных решений по организации обмена через резервированные каналы воспользуемся двумя вариантами представления мультипликативного критерия, объединяющего частные критерии вероятности безошибочной доставки пакета и ее задержку. Задержку доставки определим двумя способами. В первом случае как среднее время пребывания пакета: $M_1 = P/T$, Во втором – как средний запас времени до предельно допустимого времени ожидания t_0 : $M_2 = P(t_0 - T)$.

Первый вариант мультипликативного критерия учитывает, что среднее время T должно быть как можно меньше, а второй, что запас времени $(t_0 - T)$ должен быть как можно больше. Специфике передачи пакетов критичных ко времени доставки более соответствует второй вариант мультипликативного критерия.

Зависимость эффективности резервированной передачи копий пакетов по мультипликативному критерию M_1 и M_2 от кратности резервирования передач представлена на рис. 4а и 4б. Расчет проведен при $m = 5$ шт.; $N = 256$ бит; $L = 100$ Мбит/с; $B = 10^{-3}$. На рисунках кривые 1–6 соответствуют интенсивности потока запросов на передачу пакетов $\Lambda = 1,4 \times 10^5, 1 \times 10^5, 7 \times 10^4, 4 \times 10^4, 2,5 \times 10^4, 1 \times 10^3$ 1/с.

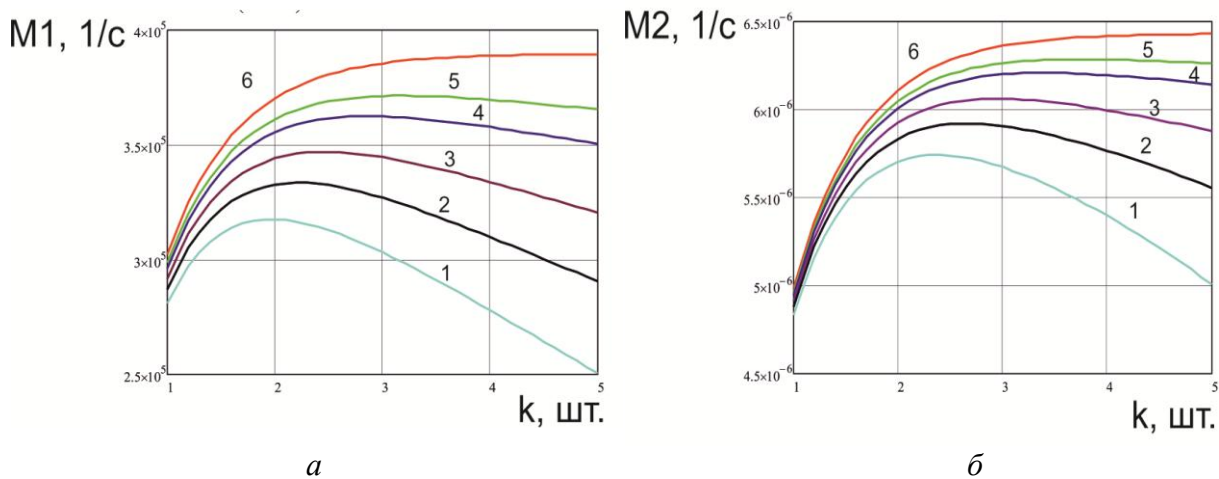


Рис. 4. Эффективность резервированной передачи копий пакетов:

а – по мультипликативному критерию M_1 ; б – с учетом допустимого времени ожидания по мультипликативному критерию M_2

Представленные зависимости показывают, что при росте кратности резервирования передач эффективность резервированной передачи растет до некоторого порога, после чего она начинает падать. Иначе говоря, существует оптимальное значение кратности резервирования передач. Таким образом, при выборе проектных решений по организации передачи пакетов в сетях с резервированием каналов требуется решение оптимизационной задачи. Дробное значение оптимальной кратности резервирования свидетельствует о целесообразности смешанной стратегии назначения кратности резервирования передач, Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

когда с некоторыми вероятностями выбираются целые значения кратностей резервирования из некоторого множества значений. Расчет, иллюстрируемый рис. 3, проведен при использовании каналов связи с вероятностью битовых ошибок ($B = 10^{-3}$). С уменьшением этой вероятности оптимальная кратность резервирования передач увеличивается.

Заключение

Построен комплекс моделей надежности и производительности, нацеленных на поддержку автоматизированного проектирования в части выбора рациональных вариантов организации резервированной обработки запросов. Показана возможность их применимости для построения систем предоставления информационных услуг. Проведена оптимизация выбора кратности резервирования вычислительных узлов для обработки блоков данных на основе моделей многоканальных систем массового обслуживания. Показано существование областей целесообразности применения кратного резервирования.

Публикации

1. Богатырев В.А., Сластихин И.А. Эффективность резервированного выполнения запросов в многоканальных системах обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 311–317.
2. Богатырев В.А., Сластихин И.А. Эффективность резервированной передачи данных через агрегированные каналы // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 5. С. 370–376.
3. Богатырев В.А., Сластихин И.А. Резервирование передач через агрегированные каналы, разделяемые на группы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1137–1140.
4. Сластихин И.А. Модель многоканальных систем обслуживания с резервированным выполнением копий запросов при предоставлении информационных услуг // Актуальные проблемы технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа, 2015. С. 112–113.
5. Сластихин И.А. Многоканальные системы обслуживания с возможностью ошибок и повтором вычислений // Проблемы и перспективы технических наук: сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа, 2015. С. 37–39.
6. Сластихин И.А. Выбор проектных решений по организации передачи через резервированные каналы связи // Вестник научных конференций. 2016. № 1-5 (5). С. 178–180.

Литература

1. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем: учебное пособие. СПб., 2009. – 363 с.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М., 1979. – 432 с.



Смоловик Михаил Андреевич
Факультет инфокоммуникационных технологий
Кафедра оптических коммуникаций и измерительных систем
E-mail: ma.smolovik@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОМ МОДУЛЯТОРЕ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ (LiNbO_3) ДЛЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

М.А. Смоловик

Научный руководитель – доцент В.Е. Стригалева

Электрооптические модуляторы на основе кристалла ниобата лития (LiNbO_3) (НЛ) получили широкое применение в электрооптической технике благодаря своим уникальным свойствам. Такие модуляторы используют в системах волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для кодирования передаваемых данных [1], а также в оптических датчиках физических величин, таких как волоконно-оптические гироскопы [2], датчики тока [3], датчики напряженности электрического поля [4] и других [5]. В интерферометрических волоконно-оптических датчиках для увеличения таких параметров, как чувствительность, стабильность или динамический диапазон, применяется вспомогательная фазовая модуляция оптического сигнала [2, 4, 6, 7]. При этом вносимый модулятором фазовый сдвиг должен обладать высокой стабильностью и точностью, что предъявляет серьезные требования к используемому в датчике фазовому электрооптическому модулятору. Несмотря на многочисленные преимущества модуляторов на основе НЛ, они имеют ряд недостатков. В силу диэлектрической природы кристалла НЛ под действием приложенного к нему электрического напряжения наблюдается дрейф показателя преломления и, как следствие, смещение рабочей точки интерферометра [8]. В литературе это явление получило название *DC-дрейф* (*DC-drift*). Этот эффект оказывает нежелательное влияние на распространяющееся через модулятор оптическое излучение и вносит тем самым дополнительную разность фаз, которая приводит к увеличению ошибки измерения.

Данное исследование проводится в целях повышения точности волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), в основе работы которого лежит эффект Саньяка. Благодаря своим преимуществам перед традиционными гироскопами, ВОГ широко используются в качестве чувствительного элемента систем инерциальной навигации, ориентации и стабилизации положения объектов в пространстве [2]. Таким образом, целью данной работы является исследование влияния паразитного дрейфа показателя преломления электрооптического фазового модулятора на основе кристалла НЛ под действием приложенного электрического напряжения на точностные характеристики ВОГ, а также разработка метода подавления этого влияния.

На рис. 1 представлена блок-схема ВОГ, в составе которой находится исследуемый электрооптический модулятор. Он является частью многофункциональной интегрально-оптической схемы (МИОС), выполненной на основе одномодовых оптических волноводов, сформированных на пластине X-среза НЛ методом диффузии титана. Для подачи электрического напряжения на поверхности кристалла изготовлена система управляющих электродов, которые подключены к электронной плате электронно-измерительного блока. Внешний вид стенда для исследования переходных процессов в фазовом электрооптическом модуляторе представлен на рис. 2.

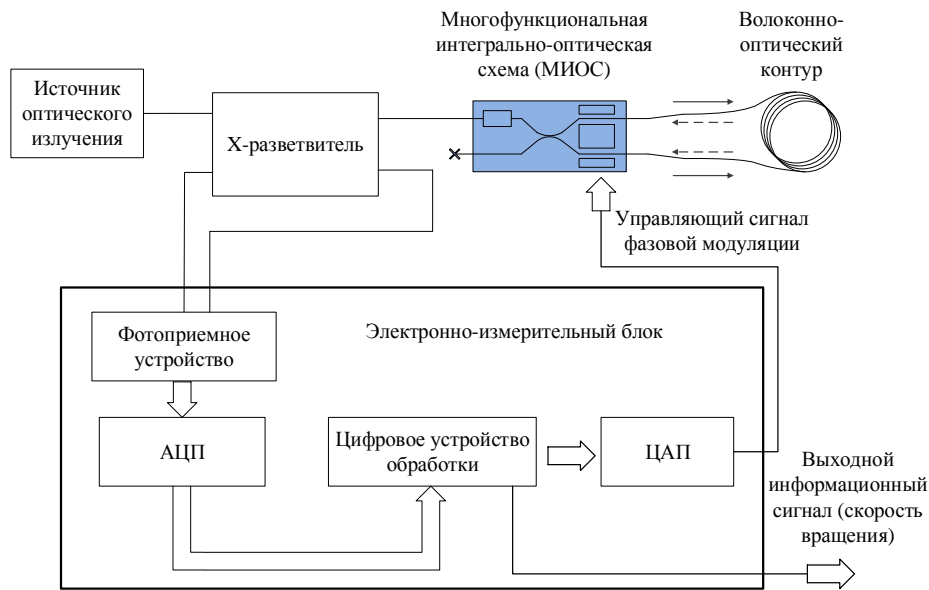


Рис. 1. Блок-схема ВОГ с модулятором на основе кристалла НЛ



Рис. 2. Внешний вид стенда для исследования электрооптического модулятора в составе ВОГ

Паразитный дрейф показателя преломления электрооптического фазового модулятора, обусловленный влиянием побочных эффектов на фазу оптического излучения, вызывает дрейф рабочей точки интерферометра, в составе которого он используется. Исходя из этого, будем рассматривать данный эффект как дрейф рабочей точки (ДРТ) интерферометра.

Для достижения поставленной цели был предложен и реализован метод исследования переходных процессов фазового электрооптического модулятора, вызванных изменением управляющего напряжения. Его суть заключается в формировании модулирующего сигнала, задающего положение рабочей точки интерферометра в точке квадратуры, и оценке величины ее отклонения от этого положения под действием побочных эффектов при скачке управляющего напряжения. Для этого модулирующий сигнал должен иметь вид, представленный на рис. 3 (нумерация соответствует подписям рис. 3).

1. Прямоугольная смещающая модуляция для установки рабочей точки интерферометра в точку квадратуры.

2. Скачок управляющего напряжения для резкого изменения величины и/или направления внешнего электрического поля.

3. Одинаковые значения напряжения меандра (п. 1) в течение всего измерения для устранения влияния эффекта паразитной амплитудной модуляции [9].

4. «Пауза» (постоянное напряжение) для устранения влияния предыдущих периодов при усреднении результатов.

Таким образом, анализу подлежит отклонение интенсивности интерференционного отклика от значения, равного $I_{max}/2$, с учетом разности фаз, вносимой вращением Земли, где I_{max} – интенсивность нулевого максимума. Такое отклонение будем называть показателем ДРТ (Δ).

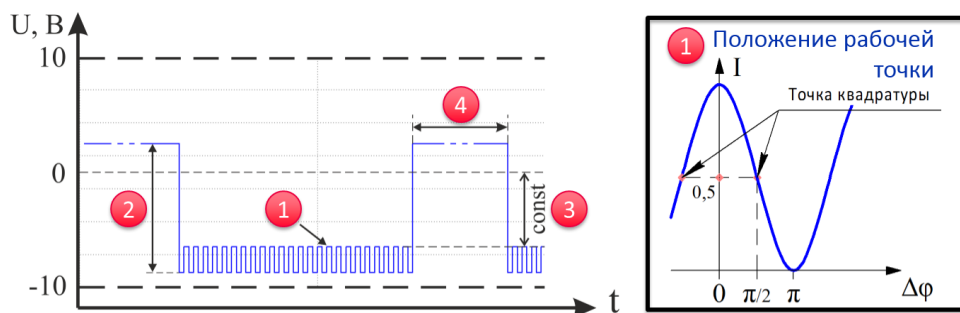


Рис. 3. Вид сигнала модуляции для измерения ДРТ

Графики зависимости показателя ДРТ от номера тактового интервала τ приведены на рис. 4 (τ – время распространения света по волоконно-оптическому контуру ВОГ). На графиках сплошными линиями показаны нечетные, а пунктирными четные отсчеты, соответствующие положениям рабочей точки интерферометра на положительном и отрицательном склонах косинусоидального отклика.

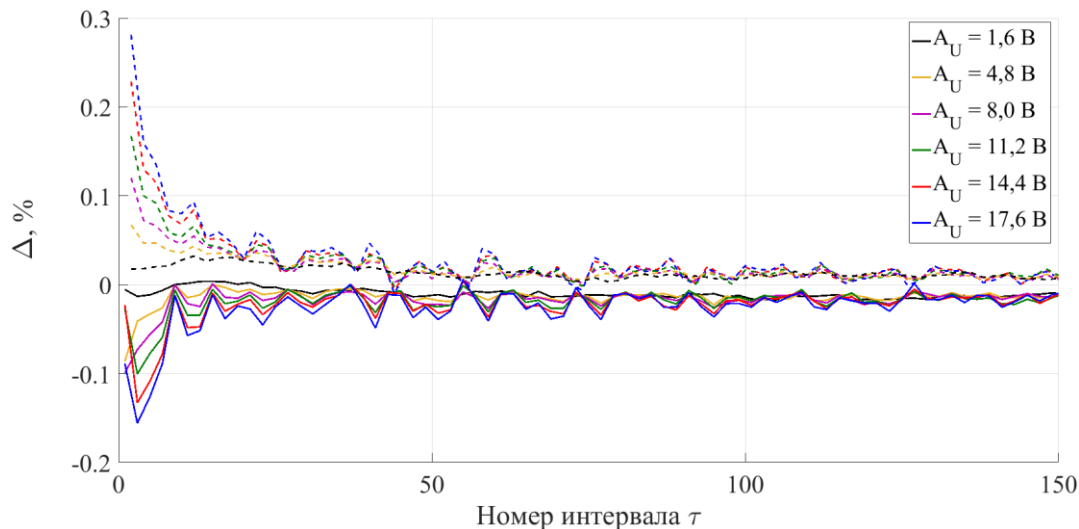


Рис. 4. Зависимость показателя ДРТ от номера тактового интервала τ за время 1,1 мс. A_u – амплитуда модулирующего напряжения

Полученный в результате исследований ДРТ может быть вызван несколькими причинами. Одна из них – механические (ультразвуковые) колебания структуры МИОС, связанные с пьезоэлектрическим и акустооптическим эффектами, вызванными частотами управляющего напряжения, совпадающими с резонансными частотами кристалла. Эти колебания приводят к изменению геометрических параметров МИОС и, соответственно, параметров канального волновода, сформированного в кристалле, а также поляризационных параметров проходящего в нем излучения (перекачка энергии между двумя ортогональными модами).

Другой причиной ДРТ при изменении модулирующего напряжения могут стать подвижные заряды, образовавшиеся в результате проникновения металла электродов в толщу подложки или вызванные дефектами в приповерхностных слоях кристалла. Они перемещаются под воздействием электрического поля, создаваемого электродами, и создают свое поле, которое может усиливать или, наоборот, ослаблять внешнее. Такие заряды обладают ограниченной подвижностью, поэтому проявляют инертность по отношению к изменению внешнего поля. Таким образом, процесс их релаксации под действием поля электродов создает дрейф величины суммарного электрического поля и, как результат, ДРТ интерферометра.

По результатам исследования было проведено моделирование влияния паразитного ДРТ на выходной сигнал ВОГ в программном пакете *Matlab Simulink*. Оказалось, что в моменты смены режима модуляции (то есть в моменты наиболее резкого изменения напряжения на электродах модулятора) в выходном сигнале скорости вращения наблюдаются выбросы, которые приводят к увеличению погрешности измерения. Для сравнения результатов моделирования с практическими был записан выходной сигнал ВОГ на частоте работы гироскопа – 136 кГц, который подтвердил их соответствие и правомерность предложенной модели.

В ходе исследований установлена зависимость паразитного ДРТ от изменения управляющего напряжения, а также предложены две причины для объяснения этого явления: механические колебания структуры МИОС при подаче управляющего напряжения с частотами, совпадающими с резонансными частотами кристалла, и влияние электрического поля подвижных зарядов. Для устранения первой причины предлагается механически фиксировать модулятор на подложке с помощью различных материалов.

Для проверки влияния механической фиксации на интерферометрический сигнал ВОГ были записаны данные интерферометрического отклика на частоте 5 ГГц с помощью высокоточного цифрового осциллографа (*Rohde & Schwarz, RTO1024*). Сигнал модуляции представлял собой меандр с размахом, соответствующим величине полуволнового напряжения. Интерферометрический отклик, полученный за один период τ , будем называть «полкой» интерферометрического отклика. На рис. 5 показаны измеренный интерферометрический сигнал (а) и его спектр (б) за время τ до и после фиксации МИОС одним из используемых в исследовании материалов.

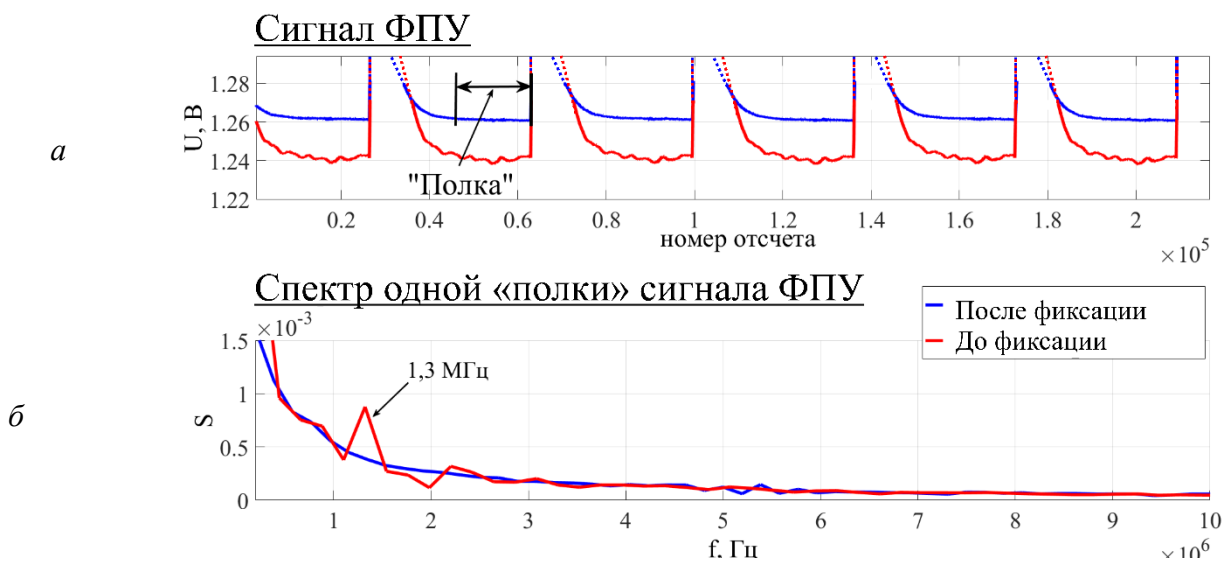


Рис. 5. Данные интерферометрического сигнала на частоте 5 ГГц: а – зависимость напряжения на выходе фотоприемного устройства от номера отсчета выборки; б – спектр сигнала одной «полки»

Из результатов видно, что до фиксации МИОС наблюдаются колебания выходной интенсивности, что в конечном итоге приводит к увеличению погрешности измерения ВОГ. Для проверки влияния фиксации МИОС на погрешность измерения угловой скорости был записан выходной сигнал ВОГ (измеренная угловая скорость) до фиксации МИОС и после нее на одном и том же образце гироскопа. В процессе измерения ВОГ находился на неподвижном горизонтальном основании, тем самым измеряемая скорость оставалась неизменной и равной проекции угловой скорости Земли на ось ВОК. Зависимость измеренной скорости вращения от времени для обоих случаев показана на рис. 6. Величина среднеквадратического отклонения (СКО) после фиксации МИОС снизилась в 3,7 раза (с 0,17 до 0,046 °/ч) при осреднении по 1 с, что подтверждает необходимость механической фиксации модулятора.

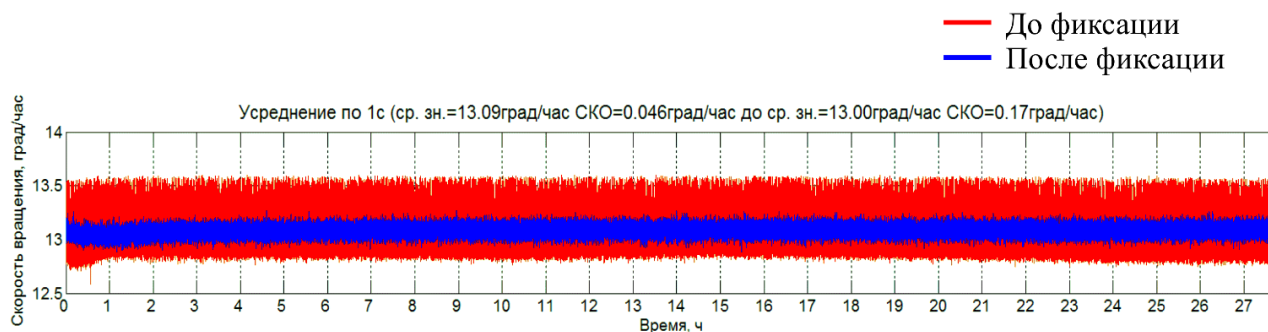


Рис. 6. ВОГ на неподвижном основании до и после фиксации МИОС

Заключение

В ходе исследований установлена зависимость паразитного ДРТ от изменения управляющего напряжения, а также предложены две причины для объяснения этого явления – механические колебания структуры МИОС при подаче управляющего напряжения с частотами, совпадающими с резонансными частотами кристалла, и влияние электрического поля подвижных зарядов. Моделирование влияния ДРТ на точностные характеристики ВОГ позволяет оценить величину ошибки измерения, которую вносят побочные эффекты электрооптического модулятора, действующие на фазу излучения. По результатам проведенных экспериментальных измерений установлено, что меры по покрытию и фиксации МИОС различными материалами привели к подавлению собственных резонансных колебаний структуры МИОС и снижению паразитного ДРТ интерферометра. В частности, фиксация МИОС на кварцевой подложке отвержденным жидким натриевым стеклом позволила снизить уровень шума измерения ВОГ в 3,7 раза (по величине СКО).

Результаты исследований применимы как в области построения оптических интерферометрических датчиков физических величин, так и в области ВОЛС. В таких системах в качестве электрооптических модуляторов в подавляющем числе случаев используются модуляторы на основе ниобата лития, поэтому представленные исследования являются актуальными. В области коммуникационных систем ВОЛС такие модуляторы представляют интерес с точки зрения увеличения скорости передачи данных.

Публикации

1. Pogorelaia D.A., Smolovik M.A., Deineka I.G., Aleinik A.S., Strigalev V.E. Investigation of the influence of residual amplitude modulation of phase electro-optic modulator on the signal of fiber-optic gyroscope // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012040.
2. Волковский С.А., Погорелая Д.А., Смоловик М.А., Алейник А.С., Никитенко А.Н. Метод оценки паразитных эффектов электрооптического модулятора в волоконно-оптическом гироскопе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 780–786.

3. *Погорелая Д.А., Алейник А.С., Смоловик М.А., Дейнека И.Г., Козлов В.Н., Михеев М.В.* Исследование влияния нелинейности передаточной характеристики фазового электрооптического модулятора на сигнал волоконно-оптического гироскопа // Сборник трудов III Международной научно-практической конференции «Sensorica-2015». СПб., 2015. С. 111–112.
4. *Алейник А.С., Погорелая Д.А., Смоловик М.А.* Исследование влияния нелинейных эффектов фазового электрооптического модулятора на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016.
URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3050/3050.pdf> (дата обращения: 14.11.16).

Литература

1. *Дмитриев С.А., Слепов Н.Н.* Волоконно-оптическая техника. Современное состояние и перспективы. 2-е изд. М., 2005. – 576 с.
2. *Lefevre H.C.* Fiber optic gyroscope. London, 2014. – 405 p.
3. *Тараканов С.А.* Новый интерферометрический метод измерения электрического тока: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2010. – 134 с.
4. *Лиюкумович Л.Б., Медведев А.В., Петров В.М.* Волоконно-оптическая поляризационно-интерферометрическая схема с двумя электрооптическими модулями для регистрации электрического поля [Электронный ресурс] // Лазеры. Измерения. Информация: материалы 22-й Международной конференции. Электронное издание .СПб., 2012. URL. http://fiber.spbstu.ru/publ/mat/conf/lmi12_mat_interf.pdf (дата обращения: 14.11.16)
5. *Окоси Т.* Волоконно-оптические датчики. Л., 1990. – 256 с.
6. *Shizhuo Y. et al.* Fiber optic sensors. 2nd ed. 2008. – 496 p.
7. Патент 2444704 Российская Федерация. Волоконно-оптический гироскоп / Мешковский И.К., Алейник А.С., Стригалева В.Е. Опубл. 10.03.2012.
8. *Nagata H.* Activation energy of DC-drift of X-cut LiNbO₃ optical intensity modulators // IEEE Photonics Technology Letters. 2000. P. 386–388.
9. *Pogorelaya D.A., Smolovik M.A., Strigalev V.E., Aleynik A.S., Deyneka I.G.* An investigation of the influence of residual amplitude modulation in phase electro-optic modulator on the signal of fiber-optic gyroscope // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 735. No 1. P. 012040.



Тупичин Евгений Александрович
Факультет систем управления и робототехники
Кафедра систем управления и информатики
E-mail:tupichin@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГАЗЛИФТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Е.А. Тупичин

Научный руководитель – профессор И.Б. Фуртат

Одной из современных проблем теории автоматического управления техническими системами является проектирование алгоритмического обеспечения регулирующих устройств в условиях априорной неопределенности параметров математических моделей объектов и при наличии внешних неизмеряемых возмущений. В таких условиях проектируемая система управления должна обеспечивать выполнение основной цели, например слежение за эталонным сигналом с требуемой точностью, что возможно осуществить, если скомпенсировать параметрические и внешние возмущения.

На сегодняшний день предложено много методов и подходов к построению систем управления в условиях неопределенности. Одним из эффективных и часто встречающимся, особенно в иностранной литературе, является метод бэкстеппинга (*backsteppingmethod*, в отечественной литературе также встречаются названия: итеративные процедуры синтеза, метод обратного обхода интегратора). Основные достоинства алгоритмов, разработанных на базе данного метода, состоят в обеспечении высокого качества переходных процессов без увеличения амплитуды управления, а также невысокий динамический порядок системы управления [1–3].

Впервые этот метод был предложен в [4] для синтеза адаптивного управления нелинейными объектами по выходу. Его использование позволило обеспечить в системе управления параметрическую робастность и возможность учета априорной информации о значениях параметров объекта управления. Использование последнего свойства наглядно продемонстрировано в работах [5, 6]. В [7] рассматривался синтез адаптивного и робастного регуляторов для управления линейными системами по выходу. В [8] предложены алгоритмы для различных классов нелинейных систем.

Однако при реализации алгоритмов [1–9] разработчик сталкивается со следующими трудностями: сложность аналитического расчета системы управления и ее технической реализации, отсутствие универсальности алгоритма по отношению к виду модели объекта управления. Сложность аналитических расчетов заключается в громоздкости вычислений полной производной по времени от стабилизирующих сигналов управления. Трудности возникающие при технической реализации связаны с большим количеством компонент и фильтров, необходимых для формирования закона управления, что связано с видом параметризации уравнения объекта.

Стоит отметить, что данные проблемы были преодолены в [5] за счет введения новой параметризации уравнения объекта и простого закона управления, позволяющего оценивать производные сигналов в замкнутой системе. Достоинством алгоритмов [6] также является предложенная инженерная методика выбора параметра регуляторов, что исключает выполнение сложных аналитических расчетов на практике.

Яркими примерами практического применения систем управления нелинейными динамическими объектами в условиях неопределенности являются проблемы управления процессом газлифта.

Одним из способов добычи нефти из нефтяных скважин является газлифтная эксплуатация – эффективный и универсальный вариант механизированной добычи. Он заключается в нагнетании газа через газлифтный клапан в затрубное пространство. Поступая в трубу, он образует газожидкостную смесь и способствует созданию перепада давления, в результате чего за счет естественной энергии пласта происходит подъем жидкости по стволу. На основе идей, предложенных в [7, 8] авторы исследования [8] разработали математическую модель, описывающую газлифтный процесс в нефтяных скважинах и представленную нелинейным дифференциальным уравнением. Одной из основных целей при газлифтной эксплуатации нефтяных скважин является добыча нефти оптимальным способом при закачке газа с учетом экономической и технологической целесообразности. Для достижения этой цели в [6–9] ставится линейно-квадратичная задача оптимального управления. В [8, 9] она решена, в результате чего удается найти программные управления и траектории. Далее, используя их, строится оптимальный регулятор, который стабилизирует газлифтный процесс около программных траекторий. Однако регуляторы, предложенные в [8, 9], достаточно чувствительны к возмущениям, возникающим из-за нестационарности параметров внутри скважины и внешних воздействий со стороны компрессорной установки на ее входе. К тому же погрешность вычислений и качество регулирования существенно зависит от нелинейностей, которыми авторы работ [6, 9] пренебрегли при синтезе оптимального управления.

Газлифтная скважина представляет собой насосно-компрессорную трубу (НКТ), охваченную кольцевым затрубным пространством (рис. 1) [3], через которое с поверхности подается сжатый газ. Поступая в НКТ, он образует у основания трубы газожидкостную смесь (ГЖС) относительно легкого удельного веса. При этом имеющееся пластовое давление бывает достаточным для поднятия ее на поверхность.

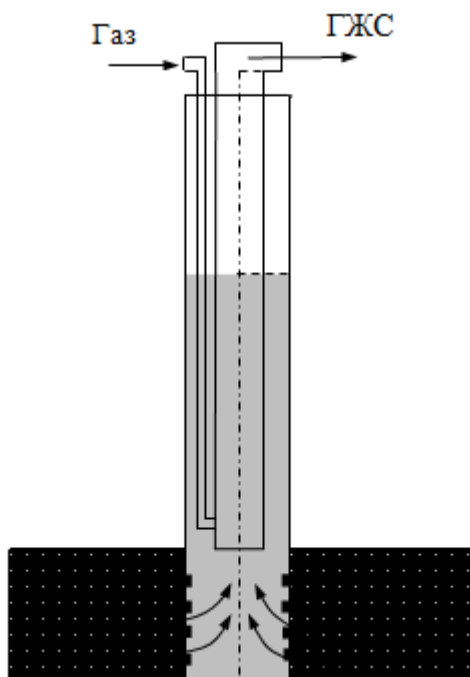


Рис. 1. Схема процесса газлифта

В ходе выполнения проекта разработана система робастного управления процессом газлифта и опубликована в [10]. На рис. 2 представлены результаты моделирования по измеряемому $y(t)$ и эталонному $u_M(t)$ дебиту скважины [10].

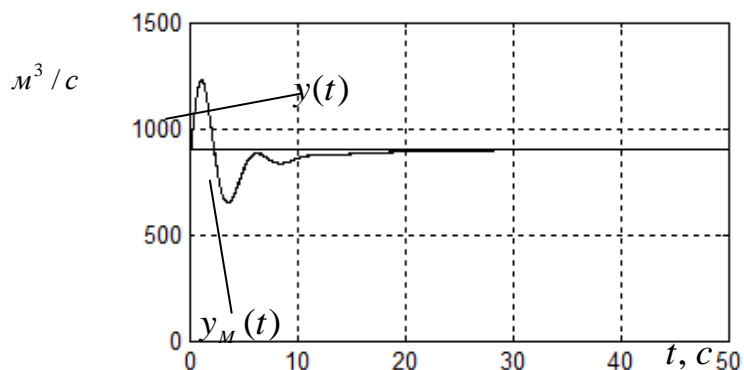


Рис. 2. Переходные процессы по измеряемому дебиту скважины $y(t)$ и эталонному $y_M(t)$

Полученные в проекте результаты могут быть использованы для управления процессом газлифтной эксплуатации нефтяных скважин. Полученные алгоритмы обеспечат субоптимальную стабилизацию подаваемого газа и дебита эксплуатации нефтяных скважин в условии неопределенности параметров межтрубного пространства.

Предложен алгоритм бэкстеппинга для управления процессом газлифта в условии неопределенности с обеспечением заданного дебита скважины, который обусловлен оптимальной программной траекторией. Полученный алгоритм гарантирует робастность замкнутой системы по отношению к параметрической неопределенности.

Публикации

1. Furtat I.B., Tupichin E.A. Modified simple adaptive-robust backstepping algorithm // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). Międzyzdroje, 2014. P. 183–188.
2. Furtat I.B., Tupichin E.A. Control of nonlinear plant based on modified robust backstepping algorithm // IEEE Conference on Control Applications (CCA). Antibes, 2014. P. 941–946.
3. Furtat I.B., Tupichin E.A. Modified robust backstepping algorithm for plants with time delay // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Saint-Petersburg, 2014. P. 541–545.
4. Furtat I.B., Furtat E.A., Tupichin E.A. Modified backstepping algorithm with disturbances compensation // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON). Saint-Petersburg, 2015. P. 120–125.
5. Фуртат И.Б., Тупичин Е.А. Упрощенный алгоритм бэкстеппинга для управления нелинейными системами // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 173–178.
6. Фуртат И.Б., Тупичин Е.А. Управление процессом газлифтной эксплуатации нефтяных скважин в условиях параметрической неопределенности // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 4. С. 282–287.

Литература

1. Шулов В.И. Технология и техника добычи нефти. М., 1983. – 204 с.
2. Алиев Ф.А. и др. Алгоритмы построения оптимальных регуляторов при газлифтной эксплуатации // Автоматика и телемеханика. 2012. № 8. С. 3–15.
3. Furtat I.B., Tupichin E.A. Modified simple adaptive-robust backstepping algorithm // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). Międzyzdroje, 2014. P. 183–188.
4. Furtat I.B., Tupichin E.A. Control of nonlinear plant based on modified robust backstepping algorithm // IEEE Conference on Control Applications (CCA). Antibes, 2014. P. 941–946.
5. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., 1951. – 243 с.

6. Furtat I.B., Tupichin E.A. Modified robust backstepping algorithm for plants with time delay // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Saint-Petersburg, 2014. P. 541–545.
7. Aliev F.A. et al. Asymptotic method of solution for a problem of construction of optimal gas-lift process modes // Mathematical Problems in Engineering. 2010. No 191053. P. 215.
8. Furtat I.B., Furtat E.A., Tupichin E.A. Modified backstepping algorithm with disturbances compensation // 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON). Saint-Petersburg, 2015. P. 120–125.
9. Фуртат И.Б., Тупичин Е.А. Упрощенный алгоритм бэкстеппинга для управления нелинейными системами // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 173–178.
10. Фуртат И.Б., Тупичин Е.А. Управление процессом газлифтной эксплуатации нефтяных скважин в условиях параметрической неопределенности // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 4. С. 282–287.



Чечеткина Александра Юрьевна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра прикладной биотехнологии
Email: Aleksandra.chechetkina@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МЯГКОГО СЫРА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

А.Ю. Чечеткина

Научный руководитель – профессор Л.А. Забодалова

Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года предусматривает гарантированное и устойчивое снабжение населения страны безопасным и качественным продовольствием [1].

В последние годы во всем мире получило широкое признание развитие нового направления в пищевой промышленности – так называемое функциональное питание. Молочные продукты, включающие несколько тысяч наименований, являются важнейшим компонентом питания человека.

К одному из перспективных направлений в этой области относится разработка способа высокоэффективной биоконверсии белков молока с получением функциональных пищевых ингредиентов и продуктов на их основе. Молоко является важным продуктом питания для населения различных возрастных групп. По последним данным, до 10 % детей раннего возраста страдают пищевой аллергией. Увеличение случаев заболеваемости связывают с экологическими факторами и изменениями в рационе питания. Разработка специализированных гипоаллергенных продуктов – проблема, актуальная для пищевой промышленности и здравоохранения [2].

Цель проекта – разработка рецептуры и технологии изготовления комбинированного мягкого сыра со сниженной аллергенностью, улучшенными органолептическими и реологическими характеристиками.

Исследование основано на определении показателей качества мягкого сыра из комбинированного молока-сырья с наполнителем. Материалом для исследований выступают опытные образцы мягкого сыра, которые были изготовлены в лаборатории кафедры. Для разработки оптимальной технологии производства низкоаллергенных мягких сыров на основе смеси козьего молока и гидролизатов коровьего молока с добавлением растительного компонента предлагается математический расчет оптимальной рецептуры, а затем его подтверждение экспериментальным путем (производство образцов сыра с различным соотношением молочного сырья на основе традиционной технологии производства мягких сыров).

Помимо козьего молока, в качестве основного сырья предполагается использование гидролизатов белков коровьего молока. Ферментативный гидролиз белкового компонента молока (протеолиз) направлен на получение продуктов с низким аллергенным потенциалом и высокой питательной ценностью. В России гидролизаты белков молока производятся в малых количествах, а потребность в них от года к году становится все больше.

Использование *Protamex* для гидролиза молочных белков в заявленном способе позволяет провести гидролитическое расщепление белков до аминокислот и других составляющих компонентов, что обеспечивает лучшую усвояемость белкового компонента молока, а это, в свою очередь, повышает пищевую ценность готового продукта. При этом глубина гидролиза составляет 41–72 % от общего содержания белка. Это обеспечивает накопление в конечном продукте аминокислот, необходимых организму, в том числе незаменимых (триптофана, фенилаланина и тирозина, лизина, валина, изолейцина, треонина, метионина и цистеина), а также такой ценной аминокислоты, как таурин, что способствует приданию функциональных свойств конечному продукту.

Alcalase является ферментом, продуцируемым бактериями линии *Bacillus*. При гидролизе *Alcalase* протеиназной наблюдается наименьшее остаточное содержание антигенных детерминант, однако при этом белки гидролизуются до высокого количества незаменимых аминокислот. Кроме того, использование фермента *Alcalase*, разрешенного для применения в пищевых производствах и пищевых системах, обеспечивает приятный вкус готовому продукту без наличия горечи [3].

В результате получаем ферментативные гидролизаты молочных белков с повышенной биологической и пищевой ценностью, улучшенным качеством и органолептическими свойствами, а также сниженной потенциальной аллергенностью. Это дает возможность их использования в гипоаллергенных смесях со сниженной аллергенностью по отношению к белкам молока.

Для создания функциональной направленности продукта и для расширения ассортиментной линейки мягких сыров используется растительная добавка в виде муки из экструдированного нута. Для увеличения суммарного количества водорастворимых антиоксидантов нут предварительно проращивали, затем подвергали экструзии.

Экструзия – процесс, совмещающий термо-, гидро- и механохимическую обработку сырья с целью получения продуктов с новой структурой и свойствами [5]. Кроме того, в результате экструзии происходят существенные изменения и текстурирование не только на клеточном уровне, но и сложные химические, микробиологические (стерилизация) и физические процессы и явления [4]. В процессе такой обработки нута образуется новая структура в виде биополимерной пищевой пены. Бобовые различных видов экструдуют, для того чтобы облегчить процесс их перевариваемости. Экструдирование позволило повысить вкусовые качества готового продукта, поскольку крахмал расщепляется на более простые, сладкие компоненты и улетучивается неприятный запах, характерный для нута.

Требуется разработать рецептуру комбинированного сыра с растительным наполнителем при максимальном использовании всех компонентов молока. Оптимальные соотношения ингредиентов определяли в первую очередь по критериям пищевой,

биологической и энергетической ценности при ограничениях, вытекающих из структурно-параметрических моделей адекватного питания.

Для решения поставленной задачи планируется использовать методы математического моделирования, применяемые при обосновании рецептур продуктов с заданными свойствами и составом. На основе имеющихся данных была сформирована информационная матрица, на базе которой разработана система линейных балансовых уравнений: по жиру, белку, углеводам, минеральным и сухим веществам. Решали ее в программе *Microsoft Excel* с использованием функции «Поиск решения», которая позволяет выбрать оптимальную рецептуру моделируемого продукта с учетом заданных ограничений. Результаты расчетов показали, что рациональным соотношением рекомендуемых ингредиентов (молоко коровье – молоко козье – растительный компонент) в рецептуре разрабатываемого продукта является следующее: 47,6:49,4:2,9.

Оптимальные соотношения ингредиентов определяли по критериям пищевой, биологической и энергетической ценностей при ограничениях, вытекающих из структурно-параметрических моделей адекватного питания. В ходе эксперимента в продукт вносили различные массовые доли муки из нута. В результате расчетных и экспериментальных данных была подобрана оптимальная массовая доля наполнителя.

Органолептическая оценка выработанных образцов показала, что все они обладают высокими показателями органолептики, однако вкус мягкого сыра с мукой экструдированного нута набрал самые высокие оценки. Так, в этом продукте мягко ощущается привкус вводимой добавки, а контрольный образец уступает другим образцам с наполнителем по вкусу, запаху и цвету. Данные органолептического анализа приведены в Таблице.

Таблица

Органолептические показатели образцов сырного продукта

Показатель	Контрольный образец	Образец с бобовым наполнителем
Вкус и запах	Чистый кисломолочный, в меру соленый без посторонних привкусов и запахов, поверхность увлажненная, без ослизнений	В меру соленый, свойственный бобовому наполнителю, слабый аромат бобового наполнителя, поверхность увлажненная, без ослизнений
Консистенция	Нежная однородная по всей массе. Допускается слегка ломкая, но не крошлиявая	Однородная, в меру плотная, ломкая, но не крошлиявая
Рисунок	Отсутствует; допускается наличие небольших глазков круглой, овальной или угловатой формы	Отсутствует; наличие вкраплений бобового наполнителя
Цвет теста	От белого до светло-желтого, равномерный по всей массе	Белый, с равномерным распределением бобового наполнителя по всей массе

Согласно результатам экспериментов, при использовании в сырной массе бобовой муки с дозой 3 % был получен продукт, консистенция, цвет, вкус и запах которого оказались наиболее оптимальными и были оценены очень высоко. Увеличение дозы бобовой муки

сверх 3 % приводит к появлению в продукте излишнего привкуса бобового наполнителя и к ухудшению его консистенции (рис. 1).

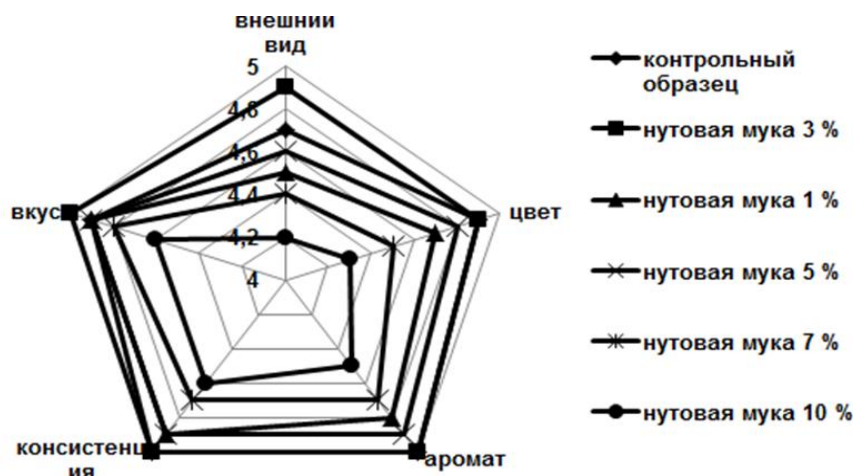


Рис. 1. Профилограмма образцов мягкого сыра

Мягкий сыр с мукой экструдированного нута представляет собой продукт белого цвета, с равномерным распределением бобового наполнителя по всей массе, весом до килограмма, поверхность увлажненная, без ослизнений; консистенция однородная, в меру плотная, ломкая, но не крошливая. Аромат сыра чистый кисломолочный, со слабым ароматом бобового наполнителя. Вкус сыра чистый, кисломолочный, в меру соленый.

За счет увеличения массовой доли сывороточных белков в мягком сыре, благодаря высокой влагоудерживающей способности нутевого наполнителя, выход продукта увеличился на 12 %. Следовательно, можно говорить о ресурсосбережении сырья.

Полученный продукт обладает усовершенствованным составом, повышенной пищевой ценностью, улучшенными реологическими характеристиками. Его можно внести в сегмент функциональных молочных продуктов, популярность которых на рынке активно возрастает.

Предполагается наладить производство разрабатываемого продукта на молокоперерабатывающих предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области как самостоятельного основного блюда, аппетитной закуски и в виде добавки к различным блюдам. Сбыт продукта предполагается в торгово-продовольственных организациях и лечебно-оздоровительных учреждениях.

Публикации

1. *Chechetkina A.I., Iakovchenko N.V., Zabodalova L.A.* The technology of soft cheese with a vegetable component // *Agronomy Research*. 2016. Vol. 14. No 5. P. 1562–1572.
2. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А.* Растительные добавки как функциональный компонент при производстве мягких сыров // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. 2015. № 4 (41). С. 106–112.
3. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А., Серова О.П.* Разработка и производство сырных продуктов с растительными компонентами // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2014. № 4 (22). С. 204–209.
4. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А.* Сырный продукт ресурсосберегающей технологии // *Инновации в современном мире: сборник статей Международной научно-практической конференции*. М., 2015. С. 45–47.
5. *Четкина А.Ю., Забодалова Л.А.* Перспективы использования растительных компонентов при производстве мягких сыров // *Fundamental and Applied Science Today VI. Proceedings of the Conference*. North Charleston, 2015. P. 157–159.

6. Чечеткина А.Ю., Белякова Т.Н., Забодалова Л.А. Комплексные пищевые добавки при производстве цельномолочных продуктов // Проблемы агропромышленного комплекса стран Евразийского Экономического Союза: материалы I Международной научно-практической конференции. Саратов, 2015. С. 239–242.

Литература

1. Горлов И. Ф. Биологическая ценность основных пищевых продуктов животного и растительного происхождения. Волгоград, 2000. – 264 с.
2. Изменение качества сои в результате экструдирования [Электронный ресурс] // Аграрный бизнес: сельскохозяйственное производство [Офиц. сайт]. URL: <http://biagroferm.ru/tech/izmenenie-kachestva-soi-v-rezultate> (дата обращения: 21.09.16).
3. Дудкин М.С. Комплексное использование растительного сырья в пищевой промышленности // Известия вузов. Пищевая технология. 1980. № 6. С. 7–14.
4. Лабинов В.В. Ситуация на мировом и российском рынках молочных продуктов // Молочная промышленность. 2006. № 11. С. 4–6.
5. Экструзия (технологический процесс) [Электронный ресурс] // Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии [Офиц. сайт]. URL: <http://www.polymerbranch.com/termoplast/view> (дата обращения: 04.10.15).



Шаталов Иван Сергеевич
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
Кафедра химии и молекулярной биологии
E-mail: shataloff.iv@gmail.com

РАЗРАБОТКА СЪЕДОБНЫХ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ С КОНСЕРВИРУЮЩИМ ДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ СЫРЬЯ И ПРОДУКЦИИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

И.С. Шаталов

Научный руководитель – профессор А.Г. Шлейкин

В настоящем исследовании был разработан и исследован съедобный упаковочный материал с консервирующими свойствами. Механические характеристики его оказались на уровне используемых в настоящее время синтетических пленок (например, полиэтиленовых). Составы пленок приведены в Табл. 1.

Материал был изготовлен на основе желатина – продукта гидролиза коллагена. Благодаря тому что желатин не обладает собственным вкусом, запахом и цветом, а также является прозрачным, упаковочный материал не оказывает заметного влияния на органолептические показатели упакованного сырья и продуктов и может использоваться в пищевой промышленности. Применение микробной трансглутаминазы (ТГ) в качестве сшивающего агента [1], помимо того, что положительно сказалось на прочностных характеристиках упаковочного материала [2, 3], позволило сохранить его безвредным

и пригодным к употреблению в пищу, а применение глицерина способствовало большей эластичности [4]. Исследования механических характеристик пленок, а именно разрывного усилия и удлинения при разрыве, выполняли на разрывной машине ИР 5071-01С (ООО «Точприбор-Сервис») в стандартных условиях. Результаты исследований, показывающие влияние фермента на изменение механических характеристик в процентном соотношении представлены на рис. 1.

Таблица 1

Состав пленок с микробной трансглутаминазой (мТГ)

Компонент	Опыт	Контроль
Желатин, %	4	4
Глицерин, %	2	2
мТГ, ед.	$4,3 \cdot 10^{-2}$	0
Низин, %	0,01	0,01
Калия сорбат, %	0,1	0,1
Вода	остальное	

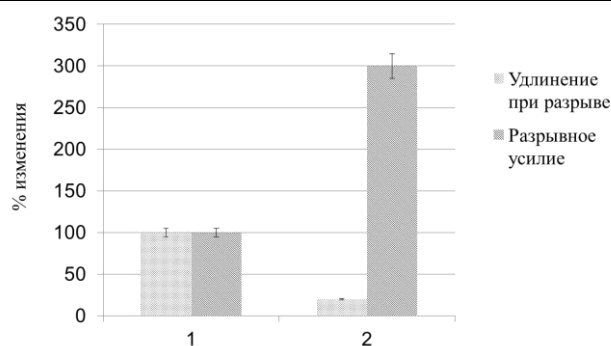


Рис. 1. Изменения механических характеристик желатиновых пленок, вызванные применением мТГ: 1 – контрольный образец; 2 – образец с мТГ

Благодаря консервирующей композиции, состоящей из сорбата калия и низина, упаковочное покрытие обладает активностью в отношении микроорганизмов – возбудителей порчи плодово-овощной продукции [5]. Результаты по оценке влияния покрытия на микрофлору представлены в Табл. 2.

Таблица 2

Исследование консервирующего эффекта

Микроорганизм	Действие
<i>Bacillus megaterium</i>	Подавление роста
<i>Escherichia coli</i>	Замедление роста
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Замедление роста

Применение данного покрытия позволит более продуктивно использовать консерванты, так как в этом случае они будут распределены строго на поверхности продукта: общее их количество на единицу объема будет заметно ниже при сопоставимой антибактериальной эффективности, по сравнению с теми случаями, когда консервант распределяется внутри всего продукта. К тому же данные покрытия можно смыть.

В процессе эксперимента было отмечено, что упаковочный материал снижает усушку продуктов, в частности клубники [5]. В последний день эксперимента разница в массе у упакованного и неупакованного образцов достигла почти 10 % (31,5 % опытный и 40,5 % контрольный образцы). Результаты по влиянию покрытия на процессы усушки представлены на рис. 2.

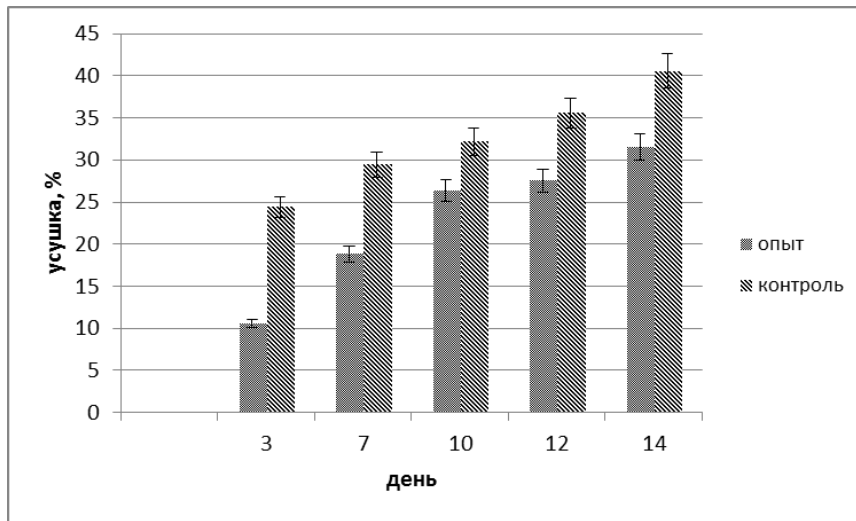


Рис. 2. Влияние упаковочного материала на усушку

Это объясняется тем, что влага мигрирует из плода по следующему механизму:

- миграция влаги из толщи плода на поверхность;
- испарение влаги с поверхности плода.

Таким образом, имеет место диффузия влаги из зон с большим количеством (мякоть) в зоны с меньшим (поверхность). В случае применения пленочного покрытия механизм потери влаги имеет несколько другой характер:

- миграция влаги из толщи плода на поверхность;
- адсорбция влаги на внутренней поверхности пленки;
- диффузия влаги в толщу пленки;
- десорбция с обратной поверхности пленки.

Отсюда возникает замедление испарения воды из плода, что в конечном итоге, может обеспечить снижение потерь сельскохозяйственного сырья и продукции в процессе хранения.

Пленочное покрытие может быть нанесено как методом распыления, так и методом иммерсии с последующим его высушиванием (например, методом сушки «в кипящем» слое), что однозначно позволяет применять его в автоматизированных системах и, соответственно, сокращать использование ручного труда. Применяемый подход исключает стадию калибровки сырья, что обеспечивает в известной степени рационализацию процесса. Таким образом, применение данного покрытия для упаковки плодов и овощей позволит увеличить сроки его хранения, что должно положительно сказаться на решении проблемы [6] снабжения населения данным видом продукции.

Публикации

1. Шлейкин А.Г., Шаталов И.С., Шаталова А.С. Применение трансглутаминазы в производстве съедобных биополимерных упаковочных пленок и покрытий // Биотехнология. Взгляд в будущее: материалы II Международной научной Интернет-конференции. Казань, 2013. С. 398–400.
2. Шаталов И.С., Шаталова А.С. Трансглутаминаза – эффективный инструмент биотехнологий // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 4. СПб., 2013. С. 107–108.
3. Шаталов И.С., Шаталова А.С., Шлейкин А.Г. Влияние упаковочного материала на основе желатина на микробиологические показатели при хранении плодов и овощей // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 4. СПб., 2014. С. 194–196.

4. Шлейкин А.Г., Шаталов И.С., Шаталова А.С. Влияние трансглутаминазы на механические характеристики упаковочного материала на основе желатина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 1 (19). С. 60.
5. Шаталов И.С., Шаталова А.С., Шлейкин А.Г. Влияние диальдегида крахмала на прочность и растяжение желатиновой пленки // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2 (20). С. 285–291.
6. Шаталова А.С., Шаталов И.С., Шлейкин А.Г. Влияние пленочного покрытия на микробиологические показатели плодов и овощей при хранении // Ежемесячный научный журнал «Prospero». 2014. № 6. С. 73–75.
7. Shatalov I.S., Shatalova A.S., Shlejkin A.G. Developing of edible packaging material based on protein film // 9th Baltic Conference on Food Science and Technology «Food for Consumer Well-Being». FOODBALT 2014. Conference Proceedings. Jelgava, 2014. P. 298–301.
8. Shatalov I.S., Shatalova A.S., Shlejkin A.G. Comparison of the influence of microbial transglutaminase and oxidized starch on mechanical properties of porcine gelatin film // 29th EFFoST International Conference: Food Science Research and Innovation: Delivering Sustainable Solutions to the Global Economy and Society. Conference proceedings. Vol. 2. Athens, 2015. P. 1530–1532.
9. Шаталова А.С., Шаталов И.С., Шлейкин А.Г., Бурова Т.Е. Сравнительный анализ белковых пленок из желатина и горохового белка // Ежемесячный научный журнал «Prospero». 2015. № 11. С. 101–103.
10. Шаталова А.С., Шаталов И.С., Шлейкин А.Г., Бурова Т.Е. Изучение свойств биodeградируемого съедобного материала на основе горохового белка // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2015. Т. 4. № 3. С. 168–170.
11. Шаталова А.С., Шаталов И.С., Шлейкин А.Г., Бурова Т.Е. Разработка съедобного упаковочного биodeградируемого пленочного материала с консервирующим эффектом на основе растительного белка // Продовольственная безопасность и научное обеспечение развития отечественной индустрии конкурентоспособных пищевых ингредиентов: материалы Международной научно-практической конференции. СПб., 2015. С. 214–216.

Литература

1. Шлейкин А.Г., Данилов Н.П. Эволюционно-биологические особенности трансглутаминазы. Структура, физиологические функции, применение // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2011. Т. 47. № 1. С. 3–14.
2. Bourtum T. Edible films and coatings: characteristics and properties // International Food Research Journal. 2008. Vol. 15. No 3. P. 147–160.
3. Shatalov I.S., Shatalova A.S., Shlejkin A.G. Comparison of the influence of microbial transglutaminase and oxidized starch on mechanical properties of porcine gelatin film // 29th EFFoST International Conference: Food Science Research and Innovation: Delivering Sustainable Solutions to the Global Economy and Society. Conference proceedings. Vol. 2. Athens, 2015. P. 1530–1532.
4. Jouki M. et al. Effect of glycerol concentration on edible film production from cress seed carbohydrate gum // Carbohydrate Polymers. 2013. Vol. 96. No 1. P. 39–46.
5. Shatalov I.S., Shatalova A.S., Shlejkin A.G. Developing of edible packaging material based on protein film // 9th Baltic Conference on Food Science and Technology «Food for Consumer Well-Being». FOODBALT 2014. Conference Proceedings. Jelgava, 2014. P. 298–301.
6. Сизенко Е.И. Неотложные задачи пищевой и перерабатывающей промышленности // Хранение и переработка сельхозсырья. 2009. № 6. С. 8–10.



Шпилин Дмитрий Игоревич
Факультет холодильной, криогенной техники
и кондиционирования
Кафедра кондиционирования воздуха
e-mail: shpilinspb@gmail.com

СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Д.И. Шпилин

Научный руководитель – профессор В.А. Пронин

Очистка и дезодорация больших объемов атмосферного воздуха являются актуальной задачей для систем жизнеобеспечения современных мегаполисов. В крупных городах одним из факторов, влияющих на ухудшение состояния среды обитания, является загрязнение воздушного бассейна. К основным источникам загрязнения относятся автотранспорт, крупные промышленные предприятия и объекты городского Водоканала. Формирование городских агломераций и одновременно дефицит земель, пригодных для жилищного строительства, приводят к тому, что жилые районы располагаются все ближе к очистным сооружениям систем канализации, водоотведения и полигонам твердых бытовых отходов. Вопросы утилизации загрязняющих веществ также остро затрагивают и предприятия городского хозяйства, занимающиеся очисткой канализационных стоков. Летучие соединения, которые выбрасываются в окружающую среду, включают целый комплекс различных веществ неорганического и органического происхождения, представляющих опасность для здоровья человека. Кроме того, по мере повышения требований к комфортности проживания в современном городе все большее внимание уделяется не только безопасности воздушной среды, но и присутствию в ней веществ (одорантов), формирующих неприятные запахи даже при концентрациях, не представляющих угрозу для здоровья. К таким дурно пахнущим веществам относятся соединения восстановленной серы (сероводород, легкие меркаптаны), азотосодержащие органические вещества, ароматические углеводороды, органические кислоты, аммиак и другие. Образование дурно пахнущих веществ на сооружениях канализации происходит в жидкой фазе в результате протекания анаэробных (гнилостных) процессов. Существует проблема контроля выбросов дурно пахнущих веществ, тесно связанных с накоплением взрывоопасных газов и биологической коррозией сооружений канализации. Выделение дурно пахнущих веществ от очистных сооружений при неблагоприятном направлении ветра также приводят к появлению жалоб со стороны населения, проживающего в прилегающих районах [1].

Цель проекта – разработка основ теории и методик расчета насадочных колонн орошаемого типа с использованием насадки, заполненной кольцами из пористых материалов.

Основными задачами исследования являются:

- разработка новых, развитие существующих и апробация перспективных методик расчета насадочных колонн орошаемого типа, основанных на математическом моделировании процессов в рабочих емкостях колонн, с использованием фундаментальных уравнений газодинамики и гидродинамики;
- использование созданных методик на стадии проектирования насадочных колонн орошаемого типа;

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга

- создание и экспериментальные испытания насадочных колонн орошаемого типа с использованием насадки, заполненной кольцами из пористых материалов, например из полимерных веществ;

- внедрение результатов работы на предприятиях соответствующего профиля и в учебном процессе специализированных кафедр.

Научная новизна работы заключается:

- в разработке математических моделей, дальнейшем совершенствовании их и прикладных программ расчета процессов, протекающих в рабочих емкостях колонн, на основе которых будут получены новые данные для проектирования насадочных колонн орошаемого типа;

- в разработке новых методик расчета на базе созданных математических моделей объемных и энергетических показателей насадочных колонн, учитывающих особенности их работы и тип насадки;

- в оценке корректности разработанных методик расчета путем сравнения данных численного и натурального экспериментов.

В настоящее время для очистки газовых выбросов используется широкий спектр химических, физико-механических, физико-химических и биологических методов, частично заменяющих и взаимодополняющих друг друга. К наиболее распространенным из них относятся:

- адсорбционные методы;
- биологическая очистка;
- абсорбционная очистка;
- ультрафиолетовая обработка.

При выборе технологической схемы дезодорации необходимо учитывать такие факторы, как:

- объем вентилируемого помещения и требуемая кратность воздухообмена;
- состав газовыделений и их концентрацию;
- органолептический уровень содержания примесей;
- наличие энергоресурсов;
- требование к выбросам в окружающую среду.

Для дезодорации больших объемов воздуха вблизи объектов загрязнения широко используются орошаемые насадочные колонны. Одним из перспективных направлений повышения эффективности очистки является изготовление насадочных тел (колец Рашига, Палля, седел Берля и других) из пористых материалов. В этой работе уделяется особое внимание абсорбционной очистке воздуха.

Насадочные колонны удовлетворительно работают только при обильном и равномерном орошении насадки жидкостью. Различается два основных режима работы аппаратов:

- пленочный, при котором жидкость, омываемая газом, стекает по элементам насадки;
- эмульгационный, когда весь аппарат заполнен жидкостью, а через ее слой между элементами насадки барботирует газ. Объектом данной работы является насадочная колонна орошаемого типа с пленочным режимом работы, собранная в лабораторных условиях.

По способу расположения насадки колонны подразделяют на: полностью насаженные, разделенные на секции и частично насаженные.

Для того чтобы насадка работала эффективно, она должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- обладать большой площадью контакта в единице объема;
- хорошо смачиваться орошающей жидкостью;
- оказывать малое гидравлическое сопротивление газовому потоку;
- быть стойкой к химическому воздействию жидкости и газа, движущихся в колонне;

- иметь малый удельный вес;
- обладать высокой механической прочностью;
- иметь невысокую стоимость.

Было проведено несколько экспериментов.

Для определения смачиваемости пористых материалов и их сопротивления воздушному потоку был спроектирован и построен лабораторный стенд, представляющий собой орошаемые колонны насадочного типа с использованием полимерной насадки. В соответствии с рабочими характеристиками, такими как скорость воздуха в колонне (0,4–0,9 м/с), расход жидкости (0,54 м³/ч) и воздуха (300 м³/ч), были сконструированы основные части стенда, а также подобрано необходимое оборудование (рис. 1): Н – насосная станция *Metabo HWW 3000/20 G*, с пропускной способностью 3 м³/ч, номинальной мощностью 0,9 кВт и объемом гидробака 24 л; Р – счетчик расхода холодной воды (до 1,5 м³/ч); распылитель представляет собой форсунку, а жидкостный резервуар – емкость объемом 0,2 м³. На входе в колонну (ниже клапана регулирования воздуха, где написано «Воздух») расположен вентилятор батутный ВР 3,15 БУ с потребляемой мощностью 0,75 кВт, и максимальным расходом воздуха 1000 м³/ч. 1/3 и 2/3 обозначены положения клапана, используемые для регулирования расхода воздуха. Максимально возможный объем насадки – 0,1 м³.

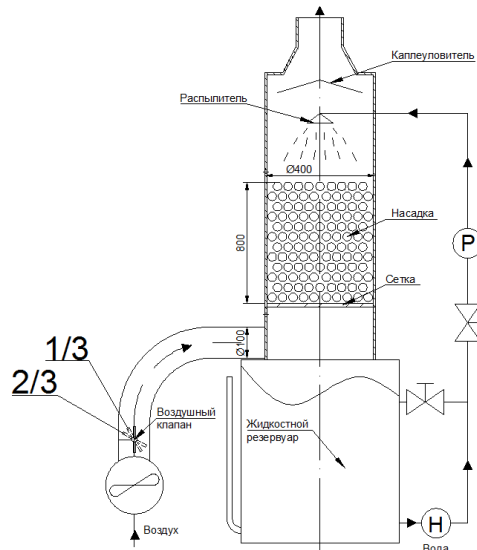


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Принцип работы

Воздух подается в установку с помощью вентилятора, его расход регулируется дроссель-клапаном. Очищаемый воздушный поток проходит через смоченную жидкостью насадку, где осуществляется контакт очищаемого воздуха с жидкостью, находящийся на поверхности пористых колец. Происходит окисление неприятно пахнущих газов. Далее очищенный воздух выходит из установки и направляется либо на следующую ступень очистки, либо непосредственно в объект (в нашем случае происходит одноступенчатая очистка). Для того чтобы предотвратить вынос капель жидкости вместе с воздухом, устанавливается каплеуловитель. Расход подаваемой жидкости регулируется с помощью двух вентилях, установленных на байпасной и главной линиях. Для замера необходимых параметров в жидкостный резервуар встроена мерная трубка. Также в воздуховоде перед насадкой и после нее проделаны технологические отверстия для возможности измерения характеристик подаваемого воздушного потока (расход воздуха, давление до и после насадки). Конструкция разработана таким образом, что воздуховод с насадкой являются быстросъемными. Это важно для проведения экспериментов, так как необходимо проводить

замеры характеристик при работе установки с использованием нескольких видов насадки, а также для ее сушки [2].

В работе данной установки применялся концептуально новый вид насадки, выполненной из полиэтилена. Она представляет собой набор колец различного размера, имеющих пористую структуру, которым заполняется насадочная колонна. Эти кольца проще в изготовлении, дешевле и легче своих аналогов.

При проведении опытов использовалось три вида насадки: с крупными кольцами ($100(D) \times 100(h) \times 5(s)$ мм), средними ($70 \times 70 \times 5$ мм) и малыми ($50 \times 50 \times 5$ мм), где D – внешний диаметр, h – высота, s – толщина стенки кольца (рис. 2).

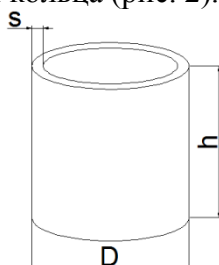


Рис. 2. Кольцо насадки

Средняя масса одного кольца: крупного – 55 г, среднего – 35 г, малого 20 г, что значительно меньше, чем у аналогичных колец Рашига из керамики или фарфора. При одинаковых размерах масса каждого из них составляет 720, 373 и 80 г соответственно.

Насадка укладывается на металлическую сетку, расположенную у основания воздуховода (рис. 3)



Рис. 3. Сетка насадочной колонны

Следует учитывать, что предложенные кольца имеют пористую структуру и хорошо продуваются воздухом, что дает возможность изготавливать их без какой-либо перфорации, необходимой для уменьшения сопротивления воздуху.

Были проведены два основных эксперимента:

- по определению смачиваемости насадки из полиэтилена при разных условиях ее загрузки, также анализировалось влияние смачиваемости на работу системы;
- по определению сопротивления воздуху, проходящему через насадку при разных способах укладки пористых колец.

Для проведения этих экспериментов было выделено две области замера основных показателей. Первая из них находится до металлической сетки, удерживающей полимерную насадку, что позволяет определять входные показатели давления и скорости, учитывающие потери в воздуховоде. Вторая область расположена непосредственно над насадкой и определяет падение давления и скорости, создаваемых полимерной насадкой.

Эксперименты проводились с использованием различных способов укладки пористых колец в слой насадки, а именно:

- хаотичной – кольца засыпались в слой насадки хаотично;
- структурированной – кольца укладывались вручную с послойным заполнением;

- каскадной структурированной – кольца укладывались вручную с послойным заполнением и использованием разных размеров (слой крупных колец, слой средних и мелких);
- каскадной хаотичной – кольца разных размеров засыпалась послойно хаотично (слой крупных колец, слой средних и мелких).

На основе проведенных экспериментов были выявлены оптимальные способы засыпки колец в слой насадки, а также оптимальные параметры подачи жидкости и воздушной массы.

Возможное внедрение результатов работы

Результаты исследования могут быть использованы при расчете и проектировании насадочных колонн орошаемого типа с применением пористой насадки на основе полимерного материала на объектах водоочистных сооружений, канализационно-насосных станций и различных объектов промышленности, находящихся вблизи жилых кварталов и выбрасывающих в атмосферу побочные продукты своего технологического цикла.

Использование рекомендаций и расчетных методик позволит сократить время и затраты при проектировании насадочных колонн и повысить энергетическую эффективность их работы.

Публикации

1. Цыганков А.В., Пронин В.А., Шпилин Д.И., Алешин А.Е. Гидродинамический расчет орошаемой колонны с пористыми насадочными телами // Вестник международной академии холода. 2014. № 2. С. 34–36.
2. Пронин В.А., Шпилин Д.И. Повышение эффективности очистки и дезодорации газозооушных выбросов пищевых предприятий в орошаемых колоннах насадочного типа с полимерной насадкой // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 4 (22). С. 195–203.

Литература

1. Цыганков А.В. и др. Гидродинамический расчет орошаемой колонны с пористыми насадочными телами // Вестник международной академии холода. 2014. № 2. С. 34–36.
2. Пронин В.А., Шпилин Д.И. Повышение эффективности очистки и дезодорации газозооушных выбросов пищевых предприятий в орошаемых колоннах насадочного типа с полимерной насадкой // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 4 (22). С. 195–203.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка метода математического моделирования геометрической формы зубчатых колес для применения в моделях ресурсных испытаний на трение и износ <i>М.Г. Акоюн</i>	4
Техническая реализация закона управления асинхронным двигателем <i>С.А. Александрова</i>	10
Мониторинг свойств полиакрилатов на разных технологических этапах их синтеза, а также исследование акриловых полимеров в качестве дисперсионных сред в импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени <i>Н.С. Балбекин</i>	16
Оптимизация конструкции микрофлюидного чипа для фиксации единичных клеток <i>К.И. Белоусов</i>	21
Расширение тензорного произведения операторов с помощью метода граничных троек <i>А.А. Бойцев</i>	25
Разработка метода выбора вспомогательных критериев оптимизации в эволюционных алгоритмах, сохраняющего особь с лучшим значением целевого критерия <i>А.С. Буздалова</i>	30
Разработка адаптивного подхода к отражению информационных угроз в государственных информационных системах <i>А.А. Володина</i>	36
Разработка датчика лага повышенной прочности <i>А.С. Воронов</i>	41
Разработка и экспериментальное исследование ступени поршневого детандера с внутренним оребрением рабочей камеры <i>П.О. Галяев</i>	46
Разработка и создание лабораторной установки для записи волоконных решеток Брэгга интерферометрическим методом с использованием эксимерной лазерной системы отечественного производства <i>А.И. Грибаев</i>	51
Метод увеличения быстродействия параметрической сходимости в задаче идентификации параметров синусоидальных сигналов <i>П.А. Грищенко</i>	57
Исследование и разработка оптико-электронной системы позиционирования с цифровой обработкой отображений оптической равносигнальной зоны <i>В.Ф. Гусаров</i>	62
Изучение свойств перспективного фотосенсибилизатора порфириновой природы «Димегина» <i>А.В. Дадеко</i>	68
Оценка уровня риска в вычислительных сетях на основе моделирования их поведения в момент атаки <i>Н.А. Дородников</i>	73
Управление мобильными роботами в неопределенных средах с препятствиями <i>М.И. Евстигнеев</i>	78
Применение робастного управления с ограничением нормы H_∞ для управления электроприводом азимутальной оси телескопа траекторных измерений «Сажень» <i>В.Д. Елистратов</i>	82

Разработка зондовых датчиков на основе гидроксипатита для изучения болезни аортального стеноза методом атомно-силовой микроскопии <i>М.В. Жуков</i>	87
Создание оптоволоконного термометра на основе люминесцентного стекла с ионами редкоземельных металлов <i>Д.А. Клюкин</i>	91
Разработка нового типа метаматериала на основе неупорядоченного массива металлических проводов с плоской границей раздела для усиления излучения от субволнового источника электромагнитного поля <i>С.Ю. Косильников</i>	95
Голограммный баллистический гравиметр <i>Е.И. Котова</i>	100
Разработка и применение методов траекторного управления автономными мобильными роботами <i>А.Ю. Краснов</i>	105
Разработка системы управления роботизированным протезом кисти с применением электромиографии и инерционных датчиков <i>С.В. Кривошеев</i>	109
Разработка алгоритмического обеспечения автоматизированного проектирования печатных узлов на основе трехмерного моделирования <i>О.В. Кузнецова</i>	114
Исследование обфускации исходных кодов на основе комплексных методов защиты программных продуктов <i>И.М. Кутузов</i>	120
Математическое моделирование процесса формирования наночастиц при гидротермальном синтезе <i>Д.А. Кучер</i>	124
Методы детектирования атак на голосовые биометрические системы с целью взлома <i>Г.М. Лаврентьева</i>	129
Волоконно-оптическая геодезическая буксируемая антенна <i>В.С. Лавров</i>	135
Разработка алгоритмов анализа опасных состояний водителей и предупреждения их об аварийных ситуациях на дорогах <i>И.Б. Лашков</i>	139
Математическое моделирование левитации диска в ближнем акустическом поле <i>И.Ф. Мелихов</i>	144
Управление спектром цепочечных наноструктур: цепочка типа «зигзаг» <i>А.С. Мелихова</i>	150
Теоретический и экспериментальный анализ закономерностей зависимостей времени когерентности спектральных суперконтинуумов от центральной длины волны исходного импульса <i>М.В. Мельник</i>	155
Управление инновационной активностью в целях обеспечения экономического развития хозяйствующего субъекта <i>Е.В. Мохнаткина</i>	161
Совершенствование технологии производства белковых молочных продуктов <i>М.С. Павлов</i>	166

Алгоритмы адаптивного управления возмущенными системами с неизвестным запаздыванием <i>А.В. Парамонов</i>	169
Исследование и повышение точностных параметров волоконно-оптического датчика угловой скорости <i>Д.А. Погорелая</i>	175
Исследование полноты системы резонансных состояний для резонаторов гельмгольца различной геометрии <i>А.И. Попов</i>	180
Разработка естественно-языкового мильтиязычного пользовательского интерфейса диалоговой системы доступа к базе данных <i>Р.В. Посевкин</i>	186
Выделение биомаркеров старения, основанных на биохимическом анализе крови, осуществляемом с помощью алгоритмов машинного обучения <i>Е.О. Путин</i>	189
Исследование лазерно-индуцированной модификации структуры и свойств фотохромных стекол <i>М.М. Сергеев</i>	194
Разработка состава лечебно-профилактического йогурта, снижающего риск онкологических заболеваний <i>Е.А. Скриплева</i>	199
Разработка моделей поддержки оптимального проектирования отказоустойчивых компьютерных систем с групповой обработкой запросов <i>И.А. Сластихин</i>	204
Исследование переходных процессов в электрооптическом модуляторе на основе кристалла ниобата лития (LiNbO_3) для задач повышения точности волоконно-оптического гироскопа <i>М.А. Смоловик</i>	210
Управление процессом газлифтной эксплуатации нефтяных скважин <i>Е.А. Тупичин</i>	216
Разработка технологии изготовления мягкого сыра функциональной направленности <i>А.Ю. Четкина</i>	219
Разработка съедобных пленкообразующих покрытий с консервирующим действием для сырья и продукции агропромышленного комплекса <i>И.С. Шаталов</i>	223
Системы очистки газовоздушных смесей <i>Д.И. Шпилин</i>	227

Сборник трудов аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под редакцией проф. В.О. Никифорова. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 235 с.

СБОРНИК ТРУДОВ АСПИРАНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Под редакцией проф. В.О. Никифорова
Дизайн обложки А.В. Чуркова
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Подписано в печать 02.06.2017
Заказ № 3751
Тираж 100 экз.