

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

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

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2015

Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 178 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.

ISBN

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2015

Авторы, 2015



*Студенты Университета ИТМО – победители конкурса грантов на церемонии награждения.
В центре советник ректора В.Б. Карасев*

В настоящее время Университет ИТМО располагает научными кадрами и развитой научно-исследовательской и инновационной инфраструктурой, обеспечивающими проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

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. Студенты университета на протяжении всех лет существования конкурса принимают в нем активное участие, благодаря чему по общему числу выигранных грантов наш вуз в последние годы занимает второе место. Университет входит в лидирующую тройку среди вузов Санкт-Петербурга по количеству поданных и выигранных заявок. В 2014 году студентами нашего университета было подано около 100 заявок, из них выиграно 43.

В настоящий сборник вошли работы студентов – победителей конкурса грантов 2014 года для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Представленные работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых студентами университета под руководством ведущих ученых вуза.

Итогом развития научной деятельности Университета ИТМО явилось включение нашего вуза в число 15 вузов страны, вошедших в программу повышения конкурентоспособности среди ведущих международных научных и образовательных центров.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Планирование и стабилизация движений двуногих роботов, балансирующих на подвижной опоре <i>Д.Н. Базылев</i>	6
Разработка конструкции энергоэффективного белого светодиода на основе неорганического композита «стекло-люминофор» <i>А.Ю. Бибик</i>	11
Расширение тензорного произведения операторов с помощью метода граничных троек <i>А.А. Бойцев</i>	16
Исследование адаптивного и робастного управления по выходу робототехническими системами <i>О.И. Борисов</i>	20
Метод построения управляющих автоматов с непрерывными воздействиями и автоматическим подбором переменных <i>И.П. Бужинский</i>	24
Повышение эффективности эволюционных алгоритмов с помощью обучения с подкреплением <i>А.С. Буздалова</i>	28
Исследование и разработка трехзеркальных объективов без промежуточного изображения <i>К.Д. Бутылкина</i>	33
Оптические свойства биосовместимых комплексов квантовых точек и хлорина еб <i>А.К. Вишератина</i>	39
Повышение точности идентификации с использованием метода каскадной фильтрации <i>П.А. Гриценко</i>	44
Активная компенсация возмущающих воздействий в робототехнических системах <i>В.С. Громов</i>	46
Исследование способов использования сигналов электромиографии в системах управления робототехническими комплексами <i>К.А. Зименко</i>	51
Создание оптической памяти <i>Д.А. Ключин</i>	55
Исследование статики и динамики чувствительных элементов герконов и акселерометров в датчиках и преобразователях <i>А.С. Козлов</i>	60
Моделирование информационной системы поддержки принятия решений выбора музыкального инструмента для поступающих в музыкальную школу <i>Н.М. Контева</i>	65
Веб-приложение оптико-цифрового диагностического телемедицинского комплекса <i>Д.С. Копылов</i>	70
Высокочастотный баллистический гравиметр на основе падающей голографической дифракционной решетки <i>Е.И. Котова</i>	74
Автоматизация процесса разработки учебного плана для вуза с применением нечетких когнитивных карт <i>И.Ю. Коцюба</i>	78
Исследование оптико-электронной системы для неинвазивного контроля уровня глюкозы в крови <i>Е.А. Ластовская</i>	82
Анализ и оценка конкурентоспособности научно-технической продукции <i>М.К. Левин</i>	88

Методики и технологии управления информационными рисками <i>М.И. Левина</i>	90
Моделирование и управление нелинейными системами с приложением к системам мобильного промышленного гидропривода <i>А.А. Лосенков</i>	93
Численное моделирование порождения индуктивных понятий методом голографии Фурье <i>Л.С. Лялюшкин</i>	97
Определение коэффициента поглощения и температурного профиля горячего газа в инфракрасной томографии <i>А.А. Макарова</i>	102
Адаптивная система управления роботами манипуляторами <i>А.А. Маргун</i>	107
Исследование дискретного спектра системы взаимодействующих частиц в деформированном волноводе с помощью метода Хартри-Фока <i>И.Ф. Мелихов</i>	113
Спектральный анализ модели прямой цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов с условием Дирихле на границе <i>А.С. Мелихова (Аникевич)</i>	118
Анализ аппаратурно-технологических факторов процесса охлаждения хлебобулочных изделий в потоке и разработка системы управления <i>А.С. Пастухов</i>	121
Повышение эффективности эволюционных алгоритмов при помощи обучения с подкреплением в нестационарной среде <i>И.А. Петрова</i>	126
Эпоксидные композиции, модифицированные фуллереном C_{60} , с повышенной ударопрочностью <i>Д.В. Пихуров</i>	132
Автоматизация сентимент-анализа естественно-языкового текста <i>Р.В. Посевкин</i>	137
Исследование перестройки нанометровых пленок полиметинового красителя при фотовозбуждении разных молекулярных форм <i>М.А. Савушкин</i>	140
Разработка технологии очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов <i>Ю.В. Цесь</i>	146
Алгоритмы управления динамическими сетями с ограничением на сигнал управления <i>Ю.В. Чугина</i>	150
Синтез наночастиц никеля и меди как наполнителей для полимерных систем <i>Е.С. Шаповал</i>	156
Разработка математических моделей эксплуатационной информационной безопасности вычислительной системы и метода проектирования средств ее защиты <i>К.А. Щеглов</i>	162
Разработка лабораторного стенда «умный дом» <i>А.Н. Щукин</i>	167
Диаманетик на основе метаматериала из массива кубических элементов <i>И.В. Ягунов</i>	172



Базылев Дмитрий Николаевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: bazylevd@mail.ru

ПЛАНИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ ДВУНОГИХ РОБОТОВ, БАЛАНСИРУЮЩИХ НА ПОДВИЖНОЙ ОПОРЕ

Д.Н. Базылев

Научный руководитель – доцент А.С. Кремлев

Целью исследования является построение математических моделей двуногих шагающих роботов, планирование траекторий, соответствующих их устойчивым движениям, разработка систем управления шагающими роботами. В рамках работы также проводилась апробация полученных алгоритмов управления роботами на практике. В частности, исследования проводились в области стабилизации движений двуногих роботов, балансирующих на различных поверхностях.

Преимущества использования шагающих роботов в различных сферах деятельности человека очевидны. Однако по определенным причинам они не получили пока в реальной жизни большого распространения. Это связано со сложностями создания математических моделей роботов и разработкой эффективных систем управления ими.

Движение двуногих роботов изучается уже более сорока лет. Большое количество статей посвящено простым моделям, таким как двуногий циркульный робот. Причем устойчивое движение таких моделей изучается как для управляемых, так и для пассивных роботов, шагающих вниз по склону.

На сегодняшний день развитие аппаратных и программных средств позволяет реализовывать на практике алгоритмы управления, разработанные в теории и прошедшие стадию компьютерного моделирования. Экспериментальная проверка может проводиться на различных элементных базах, например на робототехническом наборе *Bioid* [1], разработанном корейской компанией *Robotis*.

Стабилизация двуногого робота в положении стоя является также актуальной и увлекательной задачей. Авторы работы [2] проводят геометрический анализ двуногого гуманоидного робота *Bioid*, балансирующего на одной ноге, и предлагают свой алгоритм управления, основанный на идентификации положения центра тяжести системы. Задача стабилизации двуногого робота на двух ногах, собранного из набора *Bioid*, также рассмотрена в [3].

Bioid Premium Kit – робототехнический набор, предназначенный для образовательных и научно-исследовательских целей. Возможность создания различных шагающих роботов, вплоть до человекоподобных с восемнадцатью степенями свободы, выделяет этот набор среди прочих.

В данной работе рассматривается двуногий робот, балансирующий на нестационарной плоской опоре, угол которой может изменяться неизвестным образом в заданном диапазоне угловой скорости и координаты.

В ходе работы была определена кинематическая схема, соответствующая рассматриваемому устройству. В качестве модели шагающего робота был выбран двуногий робот, собранный из набора *Bioid Premium Kit*, производимого корейской компанией *Robotis*. Общий вид сконструированного робота на базе данного робототехнического набора представлен на рис. 1а. Данный робот имеет восемь сервоприводов.

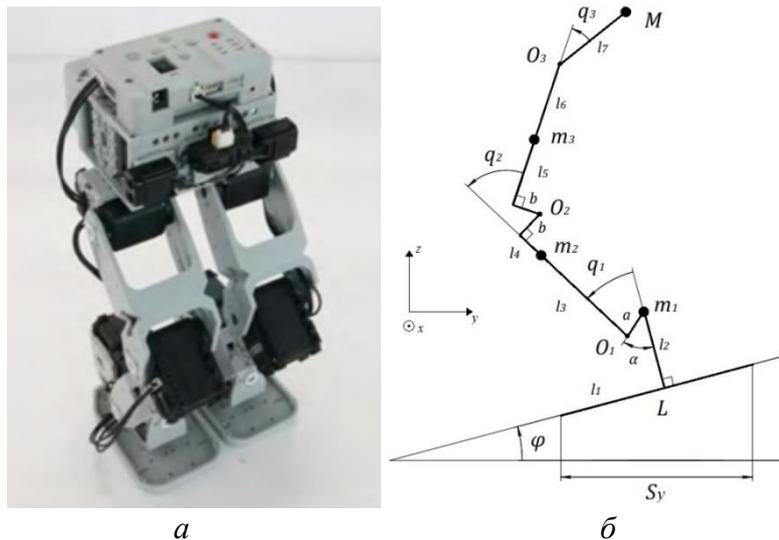


Рис. 1. Двуногий робот Bioloid: а – общий вид; б – упрощенная модель

Для получения уравнений кинематики данного робота была построена его упрощенная плоская модель, изображенная на рис. 1б.

Данная модель представляет вид робота сбоку, стоящего на нестационарной плоскости, поэтому изображены только одна нога и торс робота. Математическая модель, траектории и управление для обеих ног одинаковы. Таким образом, рассматриваемая модель имеет четыре звена и три связующих сустава. Обозначения на рисунке следующие: φ – угол нестационарной плоскости (изображена как линия), q_1 , q_2 и q_3 – угловые координаты между звеньями с массами m_1 , m_2 , m_3 и M и длинами l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , l_5 , l_6 и l_7 . L – длина стопы робота, S_y – проекция стопы робота на горизонтальную ось. Вращение между звеньями происходит в шарнирах (суставах), обозначенных O_1 , O_2 и O_3 , все другие соединения модели робота считаются жесткими.

Поскольку в данной задаче предполагается, что обе ноги движутся одинаково, то приведенная модель имеет три степени свободы.

При планировании желаемых траекторий, требовалось определить такие положения равновесия робота, при которых он может делать перешагивания и осуществлять ходьбу. Первая идея для поиска желаемых траекторий и цели управления заключается в поддержании координат центра масс робота над центром линии опоры S_y . Чтобы установить вторую связь между желаемыми угловыми координатами робота, было принято, что торс робота должен оставаться в вертикальном положении. Поскольку различные датчики и микроконтроллер расположены в основном в торсе модели, то он во многом схож с верхней частью человеческого тела. Для широкого круга задач вертикальное положение измерительных и вычислительных устройств, которыми оснащен двуногий робот, будет обеспечивать корректную и простую работу с ними. Например, если одна из осей неинерциальной системы отсчета, связанной с торсом робота, совпадает с той же осью в инерциальной системе отсчета, то при его оснащении системой технического зрения значительно упростится обработка данных с видеокamеры. Третье уравнение связи делает движения робота более человекоподобными, заставляя его оставаться именно в положении стоя, а не сидя.

Для решения поставленной задачи по стабилизации двуногoго робота в положении стоя на нестационарной опоре использовались два микроэлектромеханических датчика – двухосевой гироскоп и трехосный акселерометр, установленные в торсе робота. Аналоговые сигналы гироскопа и акселерометра измерялись с помощью встроенного в микроконтроллер ATmega 2561 десятибитного аналого-цифрового конвертера.

Точность вычисления углового перемещения по данным гироскопа снижается за счет дрейфа нуля, а в случае с акселерометром – из-за повышенной чувствительности прибора

к вибрациям и внешним воздействиям. Поэтому для получения более точных значений угла наклона торса двуногого робота был использован комплементарный фильтр с коэффициентом фильтрации $K = 0,1$.

Угловая координата четвертого звена (торса) робота в инерциальной системе декартовых координат вычисляется на основе показаний акселерометра и гироскопа с помощью комплементарного фильтра. Значения углов q_1 , q_2 и q_3 между звеньями в относительных системах координат могут быть измерены встроенными в серводвигатели dynamixel энкодерами. Точность измерения угла отклонения вала сервомотора равна $0,33^\circ$.

Таким образом, на основе тригонометрических связей модели была сформирована оценка $\hat{\varphi}$ угла нестационарной опоры по измеренным значениям q_1, q_2, q_3 и рассчитанному углу наклона торса робота в инерциальной системе координат.

Коэффициенты пропорционально-дифференциального-регулятора (ПД-регулятора) для балансирующего на нестационарной поверхности двуногого робота, реализованного на практике, выбирались исходя из следующих закономерностей. При слишком высоких значениях пропорциональной составляющей регулятора в системе управления начинаются колебательные процессы, дестабилизирующие положение равновесия робота. Значительные величины дифференциальной составляющей ведут к существенным инерционным процессам, что на практике приводит к опрокидыванию робота. Ручной подстройкой были подобраны следующие значения коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференциального-регулятора (ПИД-регулятора): $k_p = 1,1$; $k_d = 1,5$.

На рис. 2 представлена блок-схема реализованной на практике системы управления.

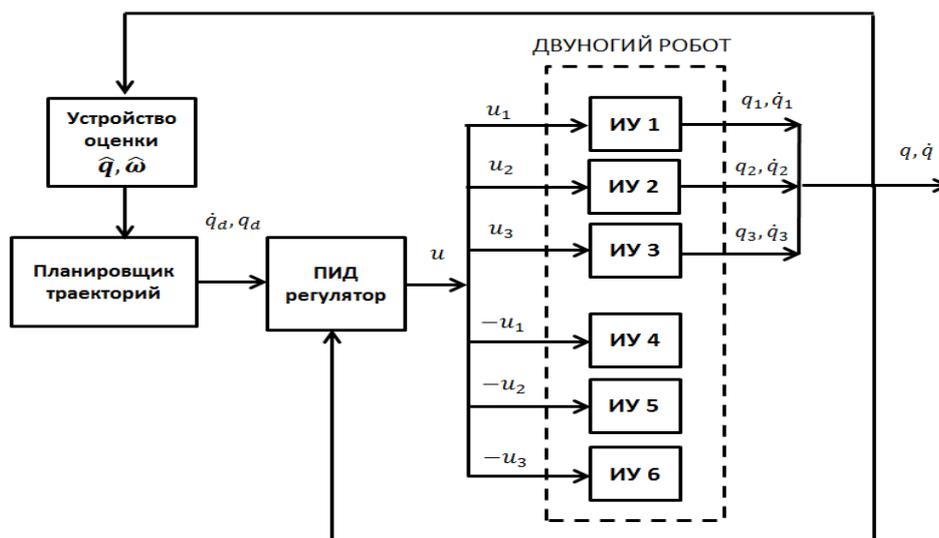


Рис. 2. Блок-схема системы управления двуногим роботом *Bioloid*: u – управления, подаваемые на встроенные регуляторы исполнительных устройств ИУ (сервоприводы *Dynamixel*); \dot{q}_d, q_d – желаемые траектории системы, рассчитанные на основе оценок угла $\hat{\varphi}$ и угловой скорости $\hat{\omega}$ нестационарной опоры, q, \dot{q} – текущие траектории системы

Полученный алгоритм управления рассматриваемым двуногим роботом был реализован на языке *C* в среде *AtmelStudio*. При запуске программы робот переходит в начальное положение, которому соответствуют угловые координаты модели $q_1 = 51^\circ$, $q_2 = 83,5^\circ$ и $q_3 = 32,5^\circ$. Данное положение равновесия робота соответствует спланированным желаемым траекториям. Далее в течение двух секунд происходит калибровка датчиков (гироскопа и акселерометра). Полученное после обработки комплементарным фильтром значение угла наклона робота инициализируется как нулевое, соответствующее вертикальному. После этого двуногий робот переходит в режим балансирования и стабилизирует свое положение, в зависимости от угла наклона и угловой

скорости вращения нестационарной опоры. В случае фиксированного положения робота, соответствующего начальным угловым координатам, потеря равновесия робота (падение) происходит при углах наклона $\varphi > 21,8^\circ$ и $\varphi < -21,8^\circ$.

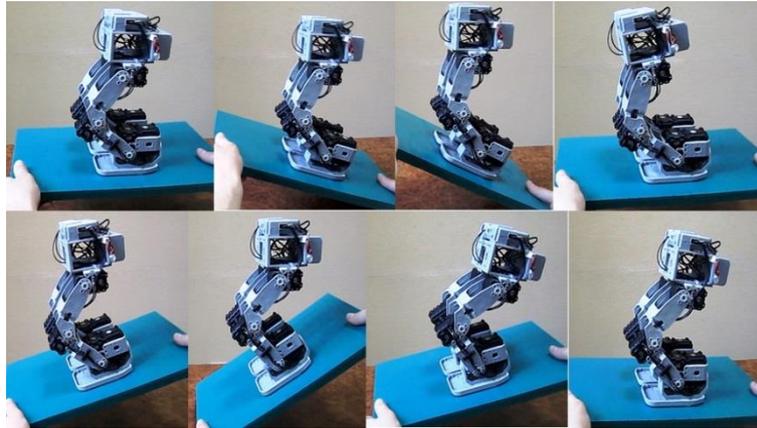


Рис. 3. Эксперимент

На рис. 3 приведен пример работы созданной системы управления двуногим роботом. На рис. 4 показан ход вычисления угла отклонения торса двуножного робота от вертикали и оценивания угла наклона $\hat{\varphi}$ нестационарной опоры во время эксперимента. На рис. 5 изображены график текущей и желаемой траекторий торса робота и график ошибки.

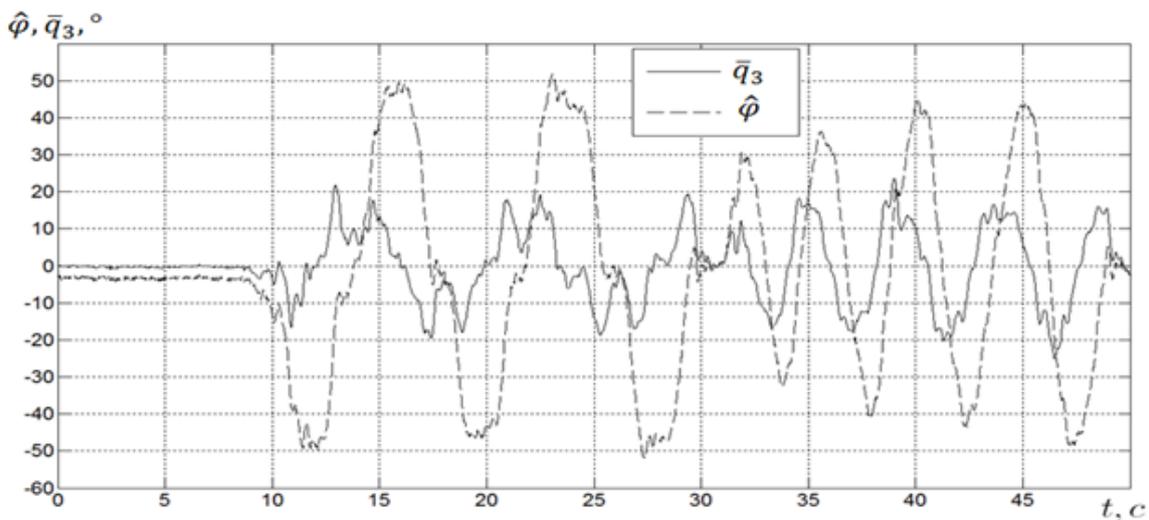


Рис. 4. Графики изменения угла \bar{q}_3 отклонения от вертикали четвертого звена двуножного робота и изменения угла $\hat{\varphi}$ наклона нестационарной опоры

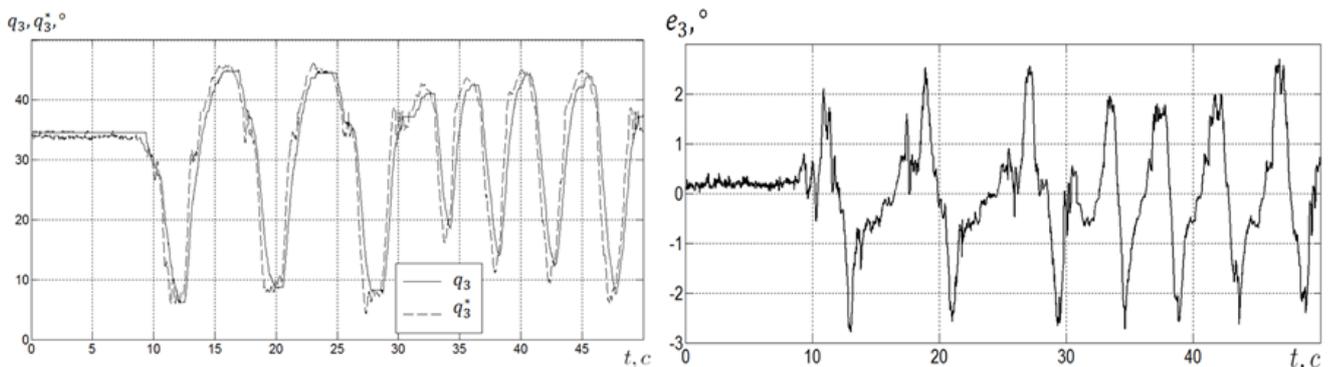


Рис. 5. Графики текущей q_3 и желаемой q_3^* траекторий торса робота и график ошибки для этого звена

Заключение

В ходе данной работы была решена задача стабилизации двуногого шагающего робота в положении стоя на нестационарной поверхности.

В качестве основы для конструирования двуногого робота на практике был использован робототехнический набор Bioid. Для созданного робота была построена и исследована математическая модель, для которой найдено множество положений равновесий таких, которые позволяют роботу совершать перешагивания и осуществлять ходьбу по подвижной опоре. Планирование траектории производилось исходя из условия стабилизации робота в положении стоя.

Для управления был использован ПД-регулятор с ручной настройкой коэффициентов. В результате подстройки были подобраны следующие значения коэффициентов: $k_p = 1,1$; $k_d = 1,5$.

Разработано устройство оценки угла и угловой скорости нестационарной опоры на основе датчиков гироскопа и акселерометра, установленных в торсе робота. Для получения более точных значений было реализовано комплексное использование показаний вышеуказанных датчиков. При этом фильтрация данных с акселерометра и гироскопа производилась с помощью комплементарного фильтра.

В эксперименте при балансировании робота угол наклонной опоры изменялся в пределах от -50 до 50° со скоростью до 80 °/с, при этом двуногий робот, реализованный на практике, сохранял устойчивость, что подтверждает работоспособность предложенных алгоритмов управления.

Предложенные в работе алгоритмы управления могут быть использованы для стабилизации подобных роботов, а также могут служить основой при разработке регуляторов и систем управления для более сложных роботов, имеющих большее число степеней свободы. Результаты данного проекта планируется использовать для управления двуногим роботом, осуществляющим ходьбу по подвижной опоре.

Публикации

1. Bazylev D., Margun A., Zimenko K., Kremlev A. Control system of biped robot balancing on board // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2014). 2014. P. 794–799.
2. Bazylev D., Margun A., Zimenko K., Kremlev A., Rukuizha E. Participation in robotics competition as motivation for learning // Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2014. Vol. 152. P. 835–840.

Литература

1. Eaton M. Evolutionary humanoid robotics: past, present and future // 50 Years of Artificial Intelligence: Essays Dedicated to the 50th Anniversary of Artificial Intelligence. 2007. P. 42–52.
2. Akhtaruzzaman M., Shafie A.A. Geometrical analysis on BIOLOID humanoid system standing on single leg // 2011 4th International Conference on Mechatronics (ICOM). 2011. P. 1–5.
3. Wolf J., Vicente A., Gibbons P., Gardiner N., Tilbury J., Bugmann G., Culverhouse P. BunnyBot: humanoid platform for research and teaching // Progress in Robotics: FIRA RoboWorld Congress 2009, Incheon, Korea, August 16–20, 2009. Proceedings. 2009. P. 25–33.



Бибик Анастасия Юрьевна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптических технологий и материалов
E-mail: anastasiya.bibik@list.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО БЕЛОГО СВЕТОДИОДА НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА «СТЕКЛО-ЛЮМИНОФОР»

А.Ю. Бибик

Научный руководитель – профессор Н.В. Никоноров

Цель исследования – разработка новых энергоэффективных неорганических люминофоров на основе высокопреломляющей свинцово-силикатной матрицы и мелкодисперсного порошка кристалла алюмо-иттриевого граната (АИГ), активированного трехвалентным церием.

Одним из традиционных методов получения светодиодов белого свечения является использование комбинации синего светодиода на основе InGaN-гетероструктур и зелено-желтых люминофоров [1]. Сегодня коммерческие люминофоры представляют собой мелкодисперсные порошки кристалла алюмо-иттриевого граната, активированного трехвалентным церием (АИГ:Ce³⁺). Для фиксации люминесцентного порошка его смешивают с жидким полимером – оптическим силиконом, который выполняет роль буферного связующего материала. Для повышения эффективности белых светодиодов силикон заменяют на неорганический материал, например стекло, у которого устойчивость к воздействию температуры и интенсивность синего излучения выше, чем аналогичные характеристики для органических материалов. В опубликованных результатах исследований в качестве матриц для люминофоров упоминаются следующие виды стекол: SiO₂–B₂O₃–RO (R = Ba, Zn) [2], P₂O₅–MgO–CaO–SrO–BaO–Dy–Tm [3], SiO₂–Na₂O₃–Al₂O₃–Ca₂O [4], SnO–ZnO–P₂O₅ [5], SiO₂–Al₂O₃–B₂O₃–ZnO–Li₂O–BaO [6]. Еще один пример использования стекла продемонстрирован в работе [7], в которой показано, что связующим буферным слоем с порошком АИГ:Ce³⁺ может служить силикатное стекло.

В представленной работе в качестве стеклообразной матрицы была выбрана свинцово-силикатная система (40SiO₂–20PbO–(40-x)PbF₂–xAlF₃, x = 25, 15, 10, 5, 0). Для создания экспериментальных образцов выбрано стекло синтезированной серии, имеющее наиболее близкий состав к требуемому. Оно содержит 15 % AlF₃, 45 % PbF₂+PbO и при этом обладает температурой стеклования 663 К.

Такой состав образцов выбран исходя из зависимости показателя преломления от концентрации фторидов свинца и алюминия (рис. 1). Замещение фторида свинца на фторид алюминия позволяет плавно варьировать показатель преломления.

Из рис. 1 видно, что увеличение количества фторида алюминия приводит к росту показателя преломления от 1,82 до 2,08. Изменяя соотношение алюминий-свинец, можно добиться полного совпадения показателей преломления кристаллического люминофора АИГ:Ce³⁺ и матрицы стекла. В нашем случае показатель преломления стекла 1,83, совпадающий с показателем преломления АИГ:Ce³⁺, достигается при содержании фторида алюминия порядка 5 мол. %.

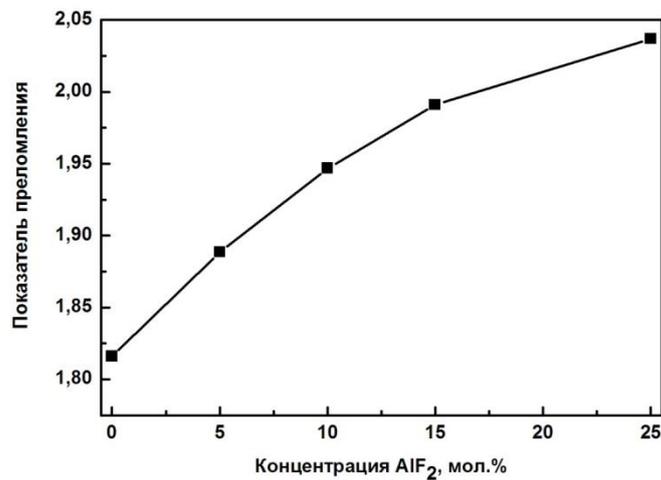


Рис. 1. Зависимость показателя преломления стекла от содержания AlF_3

Для получения композита «люминофор в стекле» исходное стекло измельчалось до порошкообразного состояния (фритта) с размером частиц порядка 50 мкм и затем смешивалось с порошком коммерческого люминофора АИГ: Ce^{3+} в соотношении 30:70, которое было выбрано исходя из состава стандартных смесей люминофора с оптическим силиконом для белых светодиодов. Получившаяся смесь запрессовывалась в форму под давлением и спекалась на подложке из кварцевого стекла в течение 30 мин при температуре 823 К. Таким образом, была получена плоскопараллельная пластинка композита «люминофор в стекле» диаметром 10 мм.

Одним из требований, предъявляемых к стеклянной фритте, является отсутствие взаимодействия кристаллического люминофора АИГ: Ce^{3+} с порошком при спекании. Это связано с тем, что широкая полоса люминесценции церия в желто-зеленой области принадлежит переходу $5d-4f$, и ее интенсивность сильно зависит от окружающей структуры. Церий, находящийся в структуре граната ($Y_3Al_5O_{12}$), обладает одной из наиболее эффективных полос люминесценции, и модификация структуры граната приводит к уменьшению интенсивности люминесценции. Для того чтобы выяснить, не нарушается ли при таком взаимодействии кристаллическая структура граната, образец композита «люминофор в стекле» был исследован методом рентгенофазового анализа. Для сравнения был добавлен спектр исходного порошка АИГ: Ce^{3+} (рис. 2).

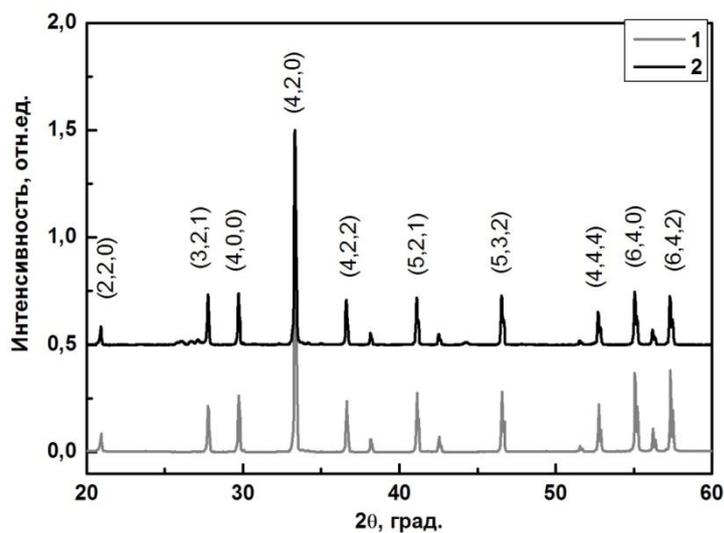


Рис. 2. Рентгенограммы: 1 – порошка кристалла $Y_3Al_5O_{12}:Ce$; 2 – композита «люминофор в стекле». В скобках обозначены индексы Миллера

На рентгенограмме видно, что положения пиков в любой матрице совпадают. Это свидетельствует о присутствии одинаковой кристаллической фазы $Y_3Al_5O_{12}$. Разница в интенсивности пиков говорит о различном объеме кристаллической фазы в образцах.

Сравним спектры возбуждения (рис. 3) и люминесценции (рис. 4) исходного порошка кристалла АИГ: Se^{3+} со спектрами АИГ: Se^{3+} в различных матрицах: коммерческом силиконе и разработанном свинцово-силикатном стекле.

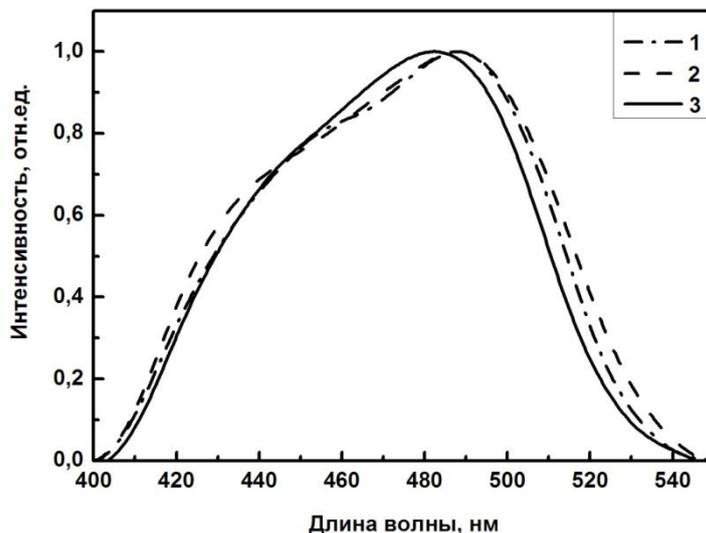


Рис. 3. Спектры возбуждения: 1 – исходного порошка АИГ: Se^{3+} ; 2 – композита «люминофор в стекле»; 3 – «люминофор в полимере»

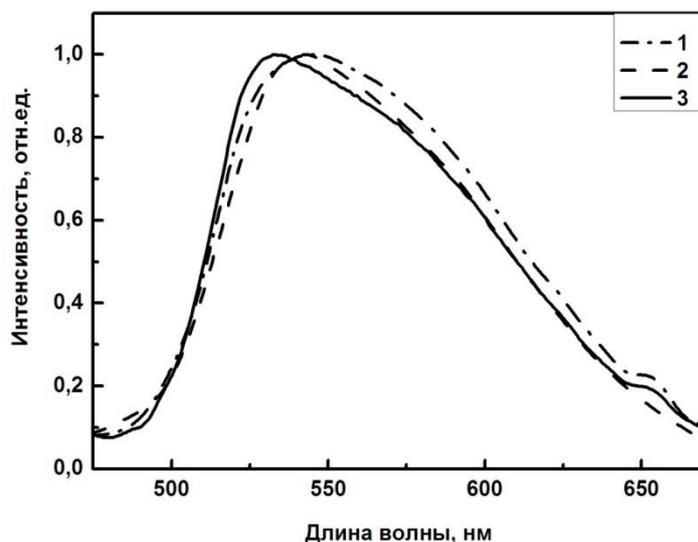


Рис. 4. Спектры люминесценции: 1 – исходного порошка АИГ: Se^{3+} ; 2 – композита «люминофор в стекле»; 3 – композита «люминофор в полимере»

На рис. 3 и 4 видно, что форма спектров практически не зависит от состава буферного связующего материала. Эти результаты также свидетельствуют о том, что значительного взаимодействия стекла и кристаллической фазы при спекании не происходит.

Рис. 5 отображает зависимость интенсивности люминесценции от температуры, которая менялась в диапазоне от комнатной до 473 К. Интенсивность люминесценции РiС для 473 К уменьшилась на 9 %, а для YAG:Se в полимере на 10 % относительно комнатной температуры. Ослабление температурного тушения для «люминофора в стекле» происходит за счет того, что матрица стекла обладает более высокой теплопроводностью (порядка 0,8 Вт/(м·К)), чем силикон (0,2 Вт/(м·К)). Это приводит к более равномерному

распределению тепла по всей поверхности образца, что снижает локальный перегрев люминофора.

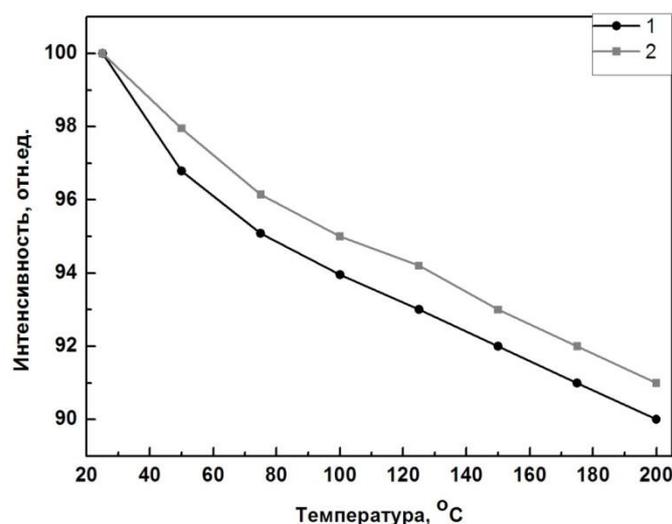


Рис. 5. Зависимости интенсивности люминесценции от температуры: 1 – для «люминофора в силиконе»; 2 – композита «люминофор в стекле»

Следующим этапом работы явилось тестирование светодиода с композитом «люминофор в стекле». На рис. 6 показан интегральный спектр излучения, состоящий из синей полосы излучения кристалла InGaN и широкой полосы Ce^{3+} в зелено-желтой области спектра. На основании интегрального спектра при помощи ПО SpectraWiz была определена цветовая температура, эффективность преобразования излучения из синего в желто-зеленое и световая отдача.

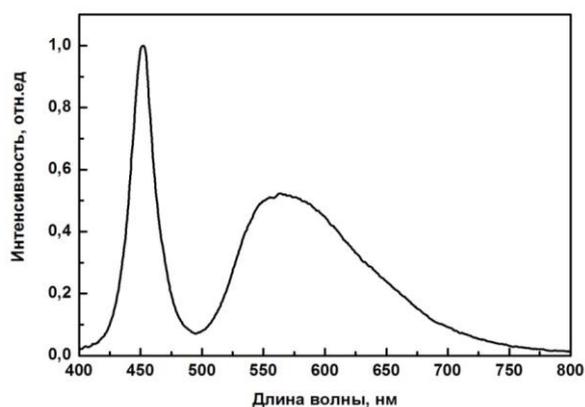


Рис. 6. Интегральный спектр излучения кристалла InGaN и композита «люминофор в стекле»

Получившийся светодиод излучает белый свет с цветовой температурой 4370 К, световая отдача при этом составила 58 лм/Вт. Значения для традиционных светодиодов с силиконом – порядка 85 лм/Вт при соизмеримой цветовой температуре.

Заключение

В ходе выполнения данного проекта разработаны составы стекол и наностеклокерамик на основе оксифторидных матриц. Методами рентгенофазового и спектрального анализа показано, что редкоземельные ионы входят в кристаллическую фазу. То есть у иона-активатора формируется кристаллическое фторидное окружение с низкофононным спектром. В этом случае спектрально-люминесцентные свойства ионов-активаторов в наностеклокерамике близки к спектрально-люминесцентным свойствам фторидных кристаллов. Исследовано влияние состава стекла и условий синтеза, концентрации

и режимов термообработки на спектрально-люминесцентные свойства редкоземельных ионов. Определены следующие важные характеристики люминофоров: длина волны и ширина полосы возбуждения, длина волны и ширина полосы люминесценции; цветовая температура. Разработан новый подход к разработке люминофоров для светодиодов белого света. Подход основан на введении высокоэффективного коммерческого порошка люминофора алюмоиттриевого граната с церием в высокопреломляющую стеклянную матрицу. Проведено испытание лабораторного образца светодиода с новыми люминофорами.

Публикации

1. Асеев В.А., Бибик А.Ю., Колобкова Е.В., Некрасова Я.А., Никоноров Н.В., Романов А.Е., Тузова Ю.В., Швалева М.А. Неорганические люминофоры в стекле на основе свинцово-силикатных стекол // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 5 (93). С. 64–70.
2. Асеев В.А., Бибик А.Ю., Колобкова Е.В., Некрасова Я.А., Никоноров Н.В., Романов А.Е., Тузова Ю.В., Швалева М.А., Бугров В.Е. Неорганический композит «стекло-люминофор» на основе высокопреломляющей свинцово-силикатной матрицы для белых светодиодов // Физика и механика материалов. 2014. Т. 21. № 3. С. 242–247.
3. Асеев В.А., Бибик А.Ю., Колобкова Е.В., Нурьев Р.К., Полякова А.В., Трофимов А.О., Тузова Ю.В. Неорганический композит «стекло-люминофор» на основе высокопреломляющей свинцово-силикатной матрицы для белых светодиодов // Сборник трудов VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2014». СПб. 2014. С. 462-463.

Литература

1. Zhao H., Liu G., Zhang J., Poplawsky J.D., Dierolf V., Tansu N. Approaches for high internal quantum efficiency green InGaN light-emitting diodes with large overlap quantum wells // Optics Express. 2011. Vol. 19. No S4. P. A991–A1007.
2. Nishiura S., Tanabe S. Preparation and optical properties of Eu²⁺ and Sm³⁺ co-doped glass ceramic phosphors emitting white color by violet laser excitation // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2008. Vol. 116. No 1358. P. 1096–1099.
3. Tsai C.C., Chen W.C., Chang J.K., Chen L.Y., Chen J.H., Hsu Y.C., Cheng W.H. Ultra-high thermal-stable glass phosphor layer for phosphor-converted white light-emitting diodes // Journal of Display Technology. 2013. Vol. 9. No 6. P. 427–432.
4. Tsvetkova M.N., Korsakov V.G., Sychev M.M., Chernovets B.V., Itkinson G.V. Study of photophosphors for white LEDs // Journal of Optical Technology. 2011. Vol. 78. No 6. P. 403–407.
5. Tsai C.C., Chung C.H., Wang J., Cheng W.C., Chen M.H., Liou J.S. et al. High thermal stability of high-power phosphor based white-light-emitting diodes employing Ce:YAG-doped glass // 2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2010. P. 700–703.
6. Tsai C.C., Liou J.S., Cheng W.C., Chung C.H., Chen M.H., Wang J., Cheng W.H. High humidity resistance of high-power white-light-emitting diode modules employing Ce:YAG doped glass // 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2011. P. 1626–1630.
7. Lee Y.K., Lee J.S., Heo J., Im W.B., Chung W.J. Phosphor in glasses with Pb-free silicate glass powders as robust color-converting materials for white LED applications // Optics Letters. 2012. Vol. 37. No 15. P. 3276–3278.



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 работе рассматривался оператор $S = A \otimes I + I \otimes T$, где A – симметрический оператор, а T – самосопряженный. Случай ограниченного оператора T уже был рассмотрен в работе [2]. Целью проекта было обобщение результатов, полученных в работе [2] на случай неограниченного самосопряженного оператора T , а именно: ставились следующие цели и задачи:

- получить граничную тройку для оператора S^* , зная граничную тройку для оператора A^* в случае, когда оператор T является неограниченным;
- получить аналитическое выражение гамма-поля и функции Вейля для S через гамма-поле и функцию Вейля оператора A ;
- на конкретных примерах операторов, используемых в физике, продемонстрировать теоретические результаты, тем самым получить корректное описание взаимодействия двух подсистем.

Для получения расширений использовался аппарат граничных троек.

Определение 1 [1, 2]. Тройка $\Pi = \{\mathcal{H}, \Gamma_0, \Gamma_1\}$, где \mathcal{H} – вспомогательное гильбертово пространство; $\Gamma_0, \Gamma_1 : \text{dom}(S^*) \rightarrow \mathcal{H}$ – линейные отображения, называется граничной тройкой оператора 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 $\Gamma = (\Gamma_0, \Gamma_1)^T : \text{dom}(S^*) \rightarrow \mathcal{H} \oplus \mathcal{H}$ сюръективно.

Определение 2 [1, 2]. Пусть $\Pi = \{\mathcal{H}, \Gamma_0, \Gamma_1\}$ – граничная тройка для оператора S^* и $S_0 = S^*|_{\ker(\Gamma_0)}$. Операторнозначные функции $\gamma(\cdot) : \rho(S_0) \rightarrow [\mathcal{H}, \mathcal{H}]$ и $M(\cdot) : \rho(S_0) \rightarrow [\mathcal{H}]$, 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.

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]:

$$(S_\Theta - z)^{-1} - (S_0 - z)^{-1} = \gamma(z)(\Theta - M(z))^{-1} \gamma^*(\bar{z}), \quad z \in \rho(S_0) \cap \rho(S_\Theta). \quad (2)$$

Она расширяет 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, имея в виду определения гамма-поля и функции Вейля, данная формула имеет прямую связь с граничными тройками.

Теорема 1 [2]. Если $\Pi_A = \{\mathcal{H}_A, \Gamma_0^A, \Gamma_1^A\}$ – граничная тройка оператора A^* , тогда $\Pi_S = \{\mathcal{H}, \Gamma_0^S, \Gamma_1^S\}$ – граничная тройка для оператора S^* , в которой $\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_T$, $\Gamma_0^S = \Gamma_0^A \otimes I$, $\Gamma_1^S = \Gamma_1^A \otimes I$.

Теорема 2 [2]. Пусть $\Pi_A = \{\mathcal{H}_A, \Gamma_0^A, \Gamma_1^A\}$ – граничная тройка оператора A^* с гамма-полем $\gamma_A(z)$. Если $\Pi_S = \{\mathcal{H}, \Gamma_0^S, \Gamma_1^S\}$ – граничная тройка для оператора S^* , то гамма-поле $\gamma_S(z)$, отвечающее граничной тройке Π_S допускает представление:

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

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

Теорема 3 [2]. Пусть $\Pi_A = \{\mathcal{H}_A, \Gamma_0^A, \Gamma_1^A\}$ – граничная тройка оператора A^* с функцией Вейля $M_A(z)$. Если $\Pi_S = \{\mathcal{H}, \Gamma_0^S, \Gamma_1^S\}$ – граничная тройка для оператора S^* , то функция Вейля $M_S(z)$, отвечающая граничной тройке Π_S допускает представление:

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

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

Теорема 4 (Теорема регуляризации) [3]. 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 $\Pi_n = \{\mathcal{H}_n, \Gamma_{0n}, \Gamma_{1n}\}$ – граничная тройка для C_n^* , $M_n(\cdot)$ – соответствующая функция Вейля, и $Q_n = R(M_n(i))$, $R_n = \sqrt{\text{Im}(M_n(i))}$. Тогда тройка

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

будет граничной тройкой для C^* .

Расширение оператора Дирака

Продемонстрируем основные результаты работы [1]. Важнейшим оператором, встречающимся в квантовой физике, является оператор Дирака. Для корректного описания взаимодействия физических подсистем используется техника самосопряженных расширений. Покажем это, опираясь на полученные результаты. Рассмотрим оператор Дирака

$$S = -ic \frac{d}{dx} \otimes I_T + I_A \otimes \begin{pmatrix} \frac{c^2}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{c^2}{2} \end{pmatrix},$$

заданный на $\mathcal{H}_S = L_2(\mathbb{R}) \otimes C^2$. Симметрическое сужение данного оператора может быть получено сужением оператора $-i \frac{d}{dx}$, а именно условием на область определения $f(0) = 0$.

Пользуясь приведенными выше результатами (теоремы 1–3), получим граничную тройку Π_S гамма-поле и функцию Вейля для оператора S^* . Для этого сначала построим граничную тройку Π_A . Интегрируя по частям, имеем:

$$(A^*f, g) - (f, A^*g) = ic(f(0+) \bar{g}(0+) - f(0-) \bar{g}(0-)).$$

Легко проверить, что операторы

$$\Gamma_0^A f = -i\sqrt{2c} \frac{f(0-) - f(0+)}{2}, \quad \Gamma_1^A = -\sqrt{2c} \frac{f(0-) + f(0+)}{2}$$

являются сюръективными и удовлетворяют соотношению. Таким образом на основании теоремы 1 граничная тройка Π_S запишется соотношениями $\Gamma_0^S = \Gamma_0^A \otimes I$, $\Gamma_1^S = \Gamma_1^A \otimes I$. Чтобы вычислить гамма-поле, необходимо построить дефектные элементы оператора A , имеющего индексы дефекта (1,1). Его можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{а) если } \operatorname{Im}(z) > 0, \text{ то } f_+(x) &= \begin{cases} e^{\frac{ix}{c}}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \\ \text{б) если } \operatorname{Im}(z) < 0, \text{ то } f_-(x) &= \begin{cases} 0, & x \geq 0 \\ e^{\frac{ix}{c}}, & x < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Теперь мы можем выписать гамма поле $\gamma_A(z)$:

$$\gamma_A(z) = \begin{cases} -i\sqrt{\frac{2}{c}}, & \operatorname{Im}(z) > 0 \\ i\sqrt{\frac{2}{c}}, & \operatorname{Im}(z) < 0 \end{cases}.$$

Гамма-поле $\gamma_S(z)$ получается из теоремы 2. Для функции Вейля $M_A(z)$ верно выражение:

$$M_A(z) = \begin{cases} i, & \operatorname{Im}(z) > 0 \\ -i, & \operatorname{Im}(z) < 0 \end{cases}.$$

Теперь на основании теоремы 3 можно написать, что $M_S(z) = M_A(z-T)$. Используя формулу (2), мы получим множество всех самосопряженных расширений оператора S .

Граничная тройка в случае, когда самосопряженный оператор T является неограниченным

Для простоты описания предположим, что оператор T имеет чисто дискретный спектр. Тогда для него справедливо спектральное разложение $S = \bigoplus_{n=1}^{\infty} C_n = \bigoplus_{n=1}^{\infty} (A \otimes I_{B_k} + I \otimes \lambda_k P_k)$. Так как проекторы — ограниченные самосопряженные операторы, то операторы $C_n = A \otimes I_{B_k} + I \otimes \lambda_k P_k$ являются замкнутыми, плотно заданными и симметрическими, и для граничной тройки оператора C_n справедлива теорема 1. То есть имеем:

$$\Gamma_0^{C_n} = \Gamma_0^A \otimes I, \quad \Gamma_1^{C_n} = \Gamma_1^A \otimes I.$$

Далее, используя теорему 4, можно модифицировать граничные операторы $\Gamma_0^{C_n}, \Gamma_1^{C_n}$ так, что прямая их сумма будет являться граничным оператором для оператора S^* .

Тем самым полностью решена задача о построении граничной тройки для оператора S^* в случае, когда самосопряженный оператор T не ограничен. Гамма-поле и функция Вейля для оператора может быть получена из соотношений, приведенных в определении 2, которые используют только информацию о граничной тройке.

Применение полученной техники

Рассмотрим конкретный пример, где симметрический оператор $A = -i \frac{d^2}{dx^2}$ имеет область определения $D(A) = \{\varphi \in W^{2,2}(a, b) \mid \varphi(a) = \varphi(b) = \varphi'(a) = \varphi'(b) = 0\}$, а оператор T задан на пространстве l^2 и имеет вид:

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & n & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \ddots \end{pmatrix},$$

то есть $\alpha_{i,j} = i\delta_i^j, i, j = 0 \dots \infty$. Очевидно, T является неограниченным оператором.

Замечание. Оператор $S = A \otimes I + I \otimes T$ может быть интерпретирован, как гамильтониан системы, где A – оператор электрона, а T – оператор квантованного электромагнитного поля, действующего в пространстве Фока.

Интегрированием по частям получим граничную форму оператора A^* , из которой граничные операторы:

$$\Gamma_{0n}^A f = \begin{pmatrix} f'(b) \\ f(a) \end{pmatrix}, \Gamma_{1n}^A f = \begin{pmatrix} f(b) \\ f'(a) \end{pmatrix},$$

а тогда по теореме 1 операторы для C_n^* имеют вид:

$$\Gamma_0^{C_n} = \Gamma_{0n}^A \otimes I, \Gamma_1^{C_n} = \Gamma_{1n}^A \otimes I.$$

Нам необходимо исправить эти граничные операторы, опираясь на теорему 4. Можно вычислить, что гамма-поле имеет вид:

$$\gamma_n(z) = \frac{i}{2\sqrt{z} \cos(\sqrt{z}(a-b))} \begin{pmatrix} -i\sqrt{z}e^{-i\sqrt{z}a} & -e^{-i\sqrt{z}b} \\ -i\sqrt{z}e^{i\sqrt{z}a} & e^{i\sqrt{z}b} \end{pmatrix} \otimes I,$$

а соответствующая функция Вейля:

$$M_n(z) = \frac{-1}{\sqrt{z} \cos(\sqrt{z}(a-b))} \begin{pmatrix} z \sin(\sqrt{z}(b-a)) & -\sqrt{z} \\ -\sqrt{z} & \sin(\sqrt{z}(b-a)) \end{pmatrix}.$$

Далее, совершив необходимые преобразования, согласно теореме 4 мы получим граничные тройки, прямая сумма которых будет граничной тройкой для оператора S^* .

Заключение

Результаты необходимы и полезны для построения явно решаемых моделей в квантовой физике. Кроме того, они будут полезны специалистам, работающим в области теории расширений операторов, в особенности интересующимся методом граничных троек, так как данный метод до сих пор практически не освещен в литературе и широко разрабатывается.

Публикации

1. Бойцев А.А., Попов И.Ю., Нейдхардт Х. Расширение тензорного произведения операторов на примере оператора Дирака // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 4 (92). С. 164–169.

Литература

1. *Бойцев А.А., Попов И.Ю., Нейдхардт Х.* Расширение тензорного произведения операторов на примере оператора Дирака // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 4 (92). С. 164–169.
2. *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.
3. *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.



Борисов Олег Игоревич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: oleg.borisow@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО И РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

О.И. Борисов

Научный руководитель – доцент А.А. Пыркин

Одной из интересных и актуальных прикладных задач теории управления является разработка систем динамического позиционирования надводных судов. Существует ряд научных работ, посвященных математическим методам адаптивного и робастного управления классом морских мобильных роботов [1, 2]. Разработка таких систем (как и вообще любых систем управления) традиционно включает следующие этапы: анализ математической модели, синтез закона управления, компьютерное моделирование и экспериментальную апробацию. Поскольку зачастую бывает сложно выполнить эксперимент на реальном судне ввиду его дороговизны и большого риска поломки, то специализированный робототехнический комплекс представляет особый интерес. Помимо этого, рассматриваемая установка может быть применена в образовательных целях для проведения лабораторных и исследовательских работ среди студентов и аспирантов.

Целью настоящего проекта является разработка системы динамического позиционирования для роботизированного макета надводного судна, являющегося частью специализированной исследовательской установки.

Необходимо осуществить стабилизацию заданных значений положения и ориентации объекта в некоторой области, провести компьютерное моделирование полученных результатов. После этого с использованием разработанной системы динамического позиционирования следует решить задачу слежения за командным сигналом с целью удержания робота на заданном маршруте. Для проведения экспериментальных исследований требуется сформировать специализированный робототехнический комплекс, после чего осуществить апробацию полученных алгоритмов управления по стабилизации значений и слежению за командным сигналом.

Основным элементом сформированного в рамках проекта комплекса является роботизированный макет судна (рис. 1б) с тремя исполнительными приводами: основной двигатель и два подруливающих устройства типа «туннельный трастер» на корме и носу. В оснастку робота также входят аккумулятор и три печатные платы. На первой расположены

входные порты, главный микроконтроллер, стабилизаторы напряжения и выпрямитель электропитания. На второй плате находится модуль беспроводной связи и блок преобразователя сигнала. Третья плата полностью состоит из трех драйверов приводов робота, которые получают сигнал с широтно-импульсной модуляцией, подлежащий обработке вспомогательным микроконтроллером. Затем через блок полевых транзисторов соответствующее напряжение подается на исполнительные приводы. Помимо этого, рассматриваемая установка содержит бассейн, представляющий собой рабочую область, цифровую камеру, закрепленную на штативе над бассейном, джойстик для удаленного управления и компьютер (рис. 1а).



а



б

Рис. 1. а – Специализированный робототехнический комплекс;
б – роботизированный макет судна

Локализация робота осуществляется с помощью системы технического зрения, состоящей из вышеупомянутой камеры, расположенной над рабочей областью, и алгоритма обработки видеозображения с целью получения текущих координат объекта. Последний распознает судно как белый прямоугольник на темном фоне, вычисляет координаты его геометрического центра и далее – курсовой угол с помощью красной метки на носу. В реальном масштабе функцию определения географических координат, как правило, выполняют спутниковые системы навигации и гироскопы. Все вычисления, формирование сигнала управления в соответствии с некоторым законом и его необходимые преобразования осуществляются на компьютере, после чего соответствующие команды передаются по радиоканалу на макет.

Очевидно, что робототехническую систему надводного судна необходимо рассматривать как многоканальную, поскольку она содержит три независимых динамических канала, соответствующих двум линейным и одной угловой координатам, однозначно определяющим положение и ориентацию судна в пространстве. Для синтеза алгоритма управления необходимо осуществить декомпозицию нелинейной динамической модели на статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом. Каждый из них соотнесем с соответствующими регулируемым переменными. Введем виртуальные сигналы управления, представляющие собой суперпозицию всех движущих сил исполнительных приводов судна. Помимо абсолютной (неподвижной) системы координат, введем в рассмотрение локальную (подвижную), жестко связанную с роботом. На этапе формирования закона управления необходимо учитывать преобразование координат из одной системы в другую.

Расчет виртуальных сигналов управления на основе текущих и заданных координат системы осуществляется с использованием робастного метода «последовательного компенсатора» для относительной степени объекта, равной двум. При этом используются

фиксированные настроечные коэффициенты регулятора, которые могут быть выбраны независимо от параметров объекта. Для расчета ошибок по динамическим каналам, связанным с линейными координатами, осуществляется преобразование из одной абсолютной системы в локальную с помощью матрицы поворота и вектора смещения. Чтобы получить реальные управляющие сигналы для приводов судна, необходимо осуществить обратное преобразование статической нелинейности, то есть, рассчитав распределитель упоров, разделить нагрузку движущей силы между всеми приводами объекта, после чего наложить ограничения на управления и обеспечить соответствующий масштаб и формат посылаемых команд.

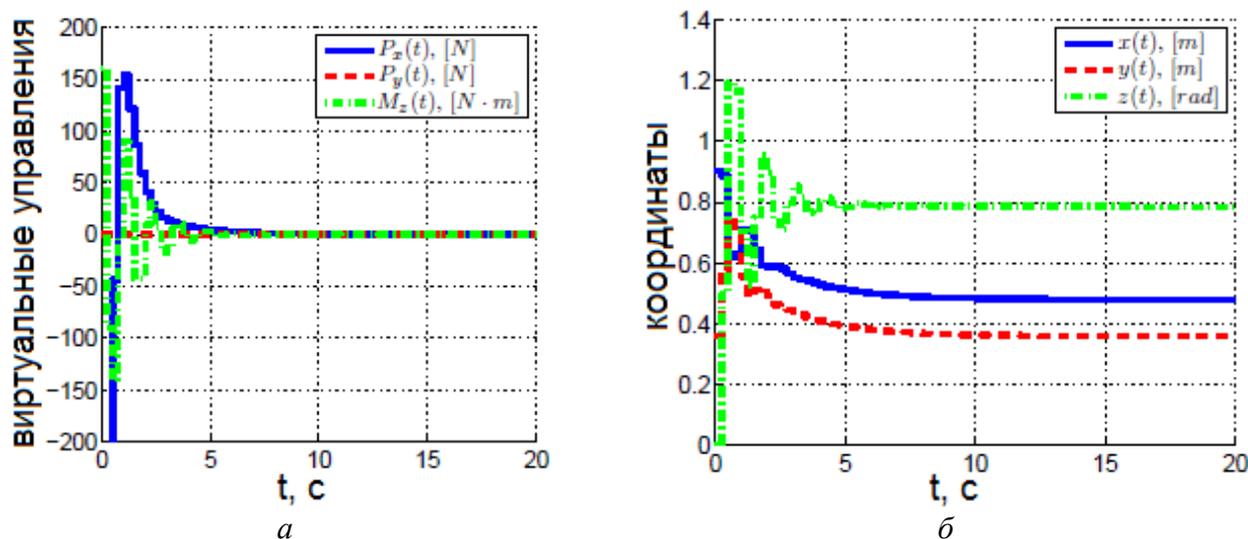


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования: а – графики виртуальных сигналов управления; б – графики координат системы

Для апробации полученной системы динамического позиционирования было осуществлено компьютерное моделирование по решению задачи стабилизации заданных значений (рис. 2). Кроме этого, были проведены экспериментальные исследования на специализированном робототехническом комплексе. Решались задачи стабилизации заданных значений положения и ориентации в некоторой области (рис. 3) и слежения за командным сигналом с целью удержания робота на некотором заранее определенном маршруте с использованием разработанной системы динамического позиционирования.

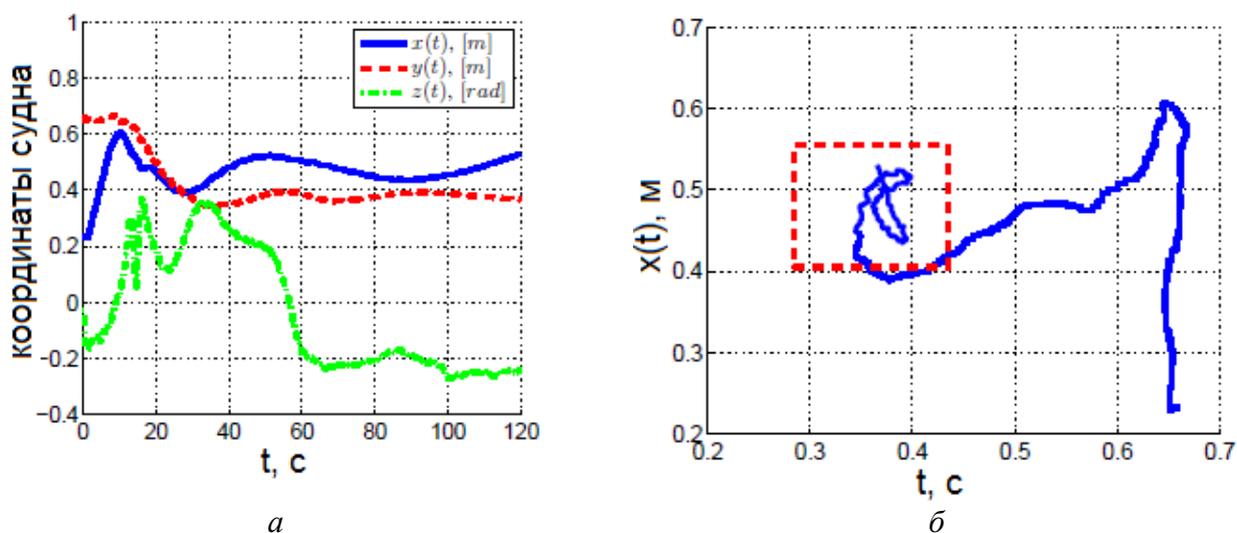


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований: а – графики координат судна; б – путь следования

В рамках выполнения настоящего проекта был решен ряд поставленных задач и получены следующие результаты:

- сформирован специализированный робототехнический комплекс моделирования движения судна с целью апробации различных алгоритмов управления, среди которых системы динамического позиционирования, компенсации внешних возмущений (при воздействии на судно ветра, волн, течения) и т. д.;
- проанализирована математическая модель многоканальной робототехнической системы надводного судна;
- произведены необходимые ее преобразования, а именно осуществлена декомпозиция многоканальной математической модели робота на статическую функцию и независимые динамические каналы с одним входом и одним выходом;
- разработана система динамического позиционирования судна на основе закона управления «последовательный компенсатор»;
- выполнено компьютерное моделирование полученной системы с фиксированными параметрами для решения задачи стабилизации заданного значения положения и ориентации судна;
- проведены экспериментальные исследования по апробации системы динамического позиционирования для стабилизации положения и ориентации корабля в некоторой области в одноканальном и многоканальном режимах;
- решена задача слежения за командными сигналами для каждого из каналов посредством разработанной системы управления с целью удержания роботизированного макета надводного судна на некотором заранее определенном маршруте движения.

Публикации

1. *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 // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). 2013. Vol. 7. No 1. P. 1867–1872.
2. *Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Surov M.O., Shavetov S.V., Borisov O.I., Gromov V.S.* Simple output stabilization approach for robotic systems // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). Vol. 7. No 1. P. 1873–1878.
3. *Bobtsov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S., Kolyubin S.A., Pyrkin A.A., Vedyakov A.A., Vlasov S.M.* MIMO positioning system for surface robotic vessel // Proceedings of the International Conference of Young Scientists AUTOMATION & CONTROL. 2013. No 1. P. 82–86.
4. *Bobtsov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S., Kolyubin S.A., Pyrkin A.A., Shavetov S.V.* Semiglobal stabilization approach for mobile robots // Proceedings of the International Conference of Young Scientists AUTOMATION & CONTROL. 2013. No. 1. P. 87–91.
5. *Борисов О.И., Власов С.М., Громов В.С., Пыркин А.А.* Образовательный комплекс апробации систем управления судами // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 58–59.
6. *Борисов О.И., Власов С.М., Громов В.С., Пыркин А.А.* Специализированный комплекс моделирования движения судна // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 290–291.
7. *Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А.* Планирование пути движения судна // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 29

Литература

1. *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 // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). 2013. Vol. 7. No 1. P. 1867–1872.

2. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A. Output controller for nonlinear and MIMO systems with delay // 2013 21st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). 2013. P. 1063–1068.



Бужинский Игорь Петрович
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: buzhinsky@rain.ifmo.ru

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ С НЕПРЕРЫВНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ И АВТОМАТИЧЕСКИМ ПОДБОРОМ ПЕРЕМЕННЫХ

И.П. Бужинский

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Цель настоящего проекта – разработка метода построения управляющих автоматов с непрерывными воздействиями, включающих в себя автоматизированный подбор переменных. Проект является развитием более раннего исследования [1], связанного с построением автоматов с непрерывными воздействиями по обучающим примерам или тестам. В предыдущем исследовании наборы переменных для автоматов считались заданным и вручную подбирались человеком. Автоматизация подбора этих наборов, предлагаемая в настоящем проекте, позволит уменьшить роль человеческого фактора в процессе построения автоматов.

Поставленная задача заключается в построении управляющего конечного автомата [2], поведение которого близко к поведению, описанному в тестах. Тест состоит из входных данных, описывающих состояние объекта управления в различные моменты времени, и выходных данных, показывающих, как должно осуществляться управление объектов, и представляющих собой значения управляющих параметров. Пример теста для задачи управления моделью самолета, используемой для тестирования предлагаемого метода, приведен в Табл. 1.

Таблица 1

Пример теста (t – время в десятых долях секунды)

Тип значения	Значение	$t = 1$	$t = 10$	$t = 20$	$t = 235$
Входное	Угол тангажа (°)	3,078	3,544	4,112	2,412
Входное	Угол крена (°)	–0,076	0,351	3,413	1,759
Входное	Угол курса (°)	198,03	198,11	198,41	205,64
Выходное	Положение элеронов (число от –1 до 1)	0,000	0,032	0,073	–0,003
Выходное	Положение руля высоты (число от –1 до 1)	–0,035	–0,039	–0,037	–0,011

Предлагаемый метод основан на использовании эволюционных алгоритмов. Выбор конкретного алгоритма сказывается на времени работы метода. В настоящем проекте используется метод спуска, также известный как *random mutation hill climber*. Особи эволюционного алгоритма являются каркасами автоматов, то есть не содержат выходных

воздействий, а расстановка их производится автоматически при помощи процедуры, описанной в [1, 3]. Научная новизна метода заключается в измененном представлении особи, в которой предлагается хранить используемые автоматом переменные. Переменные автомата в свою очередь предлагается рассматривать как частные случаи заранее определенных шаблонов переменных, которые были разработаны в рамках настоящего проекта. Рассмотрим основные положения предлагаемого метода более подробно.

Предварительные преобразования входных данных

Переменные автомата являются преобразованиями входных параметров автомата, при этом их значения могут рассматриваться не только на текущем такте, но и на предыдущих. Первым шагом для создания шаблонов переменных являются предварительные преобразования входных данных, которые убирают из них временную составляющую. Пусть P – число входных воздействий, а t – текущий момент времени, тогда $I_{i,t}$ ($1 \leq i \leq P, t > 0$) будет обозначать значение i -го входного воздействия в момент времени t , а $I_{1..P,1..t}$ – набор значений всех входных воздействий во все целочисленные моменты времени от 1 до t . В исследовании рассматриваются три различных преобразования:

- $\Lambda_i(I_{1..P,1..t}) = I_{i,t}$ – преобразование возвращает последнее значение i -го входного воздействия;
- $\Delta_i(I_{1..P,1..t}) = \rho_i(I_{i,t}, I_{i,t-1}), \Delta_i(I_{1..P,1}) = 0$ – преобразование возвращает расстояние между двумя последними значениями i -го входного воздействия, которое можно трактовать как скорость изменения этого воздействия (ρ_i в простейшем случае представляет собой разность аргументов, но может быть несколько другим при работе с углами);
- $\Phi_i(I_{1..P,1..t}) = \rho_i(I_{i,t}, I_{i,1})$ – преобразование возвращает расстояние между последним значением входного воздействия и начальным.

Таким образом, теперь можно считать, что переменные являются функциями от новых входных воздействий, число которых в три раза больше, чем исходных.

Шаблоны переменных

Идея, лежавшая за выделением предварительных преобразований, а затем и шаблонов переменных, заключалась в обобщении переменных, подобранных в [6] вручную. Оказалось, что большинство этих переменных можно представить как частные случаи нескольких шаблонов переменных, которые перечислены ниже. Шаблоны – это переменные, некоторые параметры которых могут быть не определены.

Пусть x – вектор из $3P$ преобразованных входных воздействий. Следующие шаблоны использовались для вещественных переменных:

- $1(x) = 1$ – шаблон всегда возвращает единицу и не имеет параметров;
- $w_{i,z}(x) = x_i^z$ – шаблон возвращает i -е преобразованное входное воздействие в степени z . В качестве z рассматривались значения 1 и 2. Поскольку выходное воздействие автомата является линейной комбинацией значений переменных [6], то использование этого шаблона позволяет строить квадратичные зависимости выходных воздействий от входных;
- $d_{i,c,s}(x) = \max\left(1 - \frac{|x_i - c|}{s}, 0\right)$ – шаблон является мерой близости i -го преобразованного входного воздействия к условному центру c , при этом шаблон возвращает единицу при $x_i = c$ и ноль при $|x_i - c| \geq s$.

Следующий единственный шаблон использовался для предикатов: $l_{i,c}(x) = (x_i < c)$ – шаблон возвращает истину, если значение i -го преобразованного входного воздействия меньше, чем значение условной «отсечки» c .

Особь эволюционного алгоритма

Как и в работах [1, 3], особь эволюционного алгоритма представляет собой каркас автомата, а выходные воздействия на каркасе устанавливаются так, чтобы максимизировать значение функции приспособленности для текущей особи. Подобная расстановка выходных

воздействий производится для каждой особи, появившейся в процессе работы эволюционного алгоритма. В [1] для того, чтобы в различных состояниях автомата могли использоваться различные переменные, использовались метод сокращенных таблиц и так называемые маски значимости переменных. Однако в подходе, предлагаемом в рамках настоящего проекта, необходимость в подобных масках значимости отсутствует: переменные для каждого состояния подбираются и хранятся независимо друг от друга. Рассматриваются два способа хранения вещественных переменных в особи автомата:

- заданное число вещественных переменных – для каждого управляющего параметра задается число, которое определяет, сколько вещественных переменных хранится в каждом состоянии автомата для этого управляющего параметра;
- меняющееся число вещественных переменных – число переменных может меняться в процессе построения автоматов, при этом для предотвращения их неограниченного роста из функции приспособленности автомата вычитается штраф, пропорциональный числу переменных в автомате. В этом случае в случайно сгенерированной особи в каждом состоянии для каждого управляющего автомата генерируется лишь одна переменная.

Число предикатов считается фиксированным и равным двум. Это означает, что каждый переход автомата соответствует некоторым конкретным значениям двух предикатов. Пример особи эволюционного алгоритма приведен на рис. 1 (на этом рисунке для простоты число предикатов равно единице).

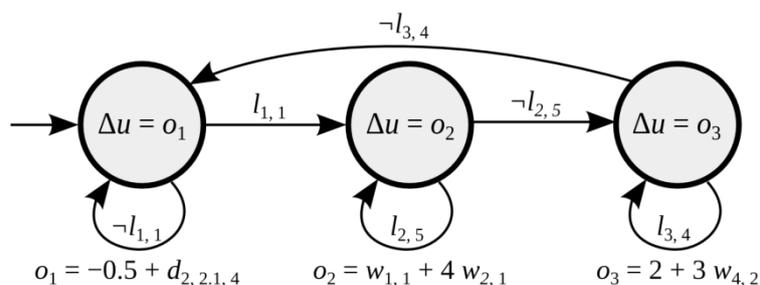


Рис. 1. Пример особи эволюционного алгоритма. Переходы аннотированы соответствующим значениям предикатов, под состояниями подписаны выходные воздействия в виде линейных комбинаций от автоматически подбираемых вещественных переменных

Разработанный метод сравнивается с его предшественником [1], не включавшим в себя автоматический подбор переменных, на задаче построения автоматов управления беспилотным самолетом в авиасимуляторе *FlightGear*. Первый этап экспериментального исследования содержит построение автоматов с различным числом состояний (от трех до пяти) и двумя различными способами хранения вещественных переменных для трех фигур пилотажа: «мертвой пели», «бочки» и разворота в горизонтальной плоскости. Для каждой комбинации указанных вариантов было произведено 50 запусков метода спуска. Далее автоматы с максимальными значениями функции приспособленности (от каждой группы из 50-ти автоматов были оставлены только 25 лучших) анализировались в моделировании, при этом для их оценки использовались два критерия качества, основанных на отклонениях углов тангажа и крена. В Табл. 2 приведены медианные значения одного из этих критериев качества для различных групп построенных автоматов.

Эксперименты показывают, что новый метод позволяет строить автоматы и наборы переменных для них. Для каждой из рассмотренных фигур пилотажа удалось построить автомат, качественно выполняющий эту фигуру. Тем не менее доля автоматов высокого качества среди построенных не столь высока по сравнению с предыдущим методом [1], что позволяет говорить о возможности дополнительных исследований по улучшению предложенного метода в будущем.

Таблица 2

Медианные значения критерия качества для угла тангажа среди различных групп автоматов

Число состояний	Число вещественных переменных	«Мертвая петля»	«Бочка»	Разворот
3	Заданное	11,217	2,951	3,603
	Меняющееся	15,686	4,01	2,905
4	Заданное	20,306	2,574	5,263
	Меняющееся	22,841	4,976	3,653
5	Заданное	14,149	3,327	5,131
	Меняющееся	15,845	5,342	5,717

Заключение

В рамках настоящего проекта был предложен новый метод построения управляющих конечных автоматов по тестам. Предложенный метод основан на более раннем [1], однако обладает качественным отличием – наборы переменных, необходимые для полного задания автоматов, определяются не перед процессом их построения, а подбираются автоматически во время него и входят в особь эволюционного алгоритма. В качестве эволюционного алгоритма был использован метод спуска.

Экспериментальное исследование было проведено на примере задачи управления моделью беспилотного самолета и включило в себя построение автоматов и запуск их в моделировании. При построении автоматов рассматривался как случай постоянного (заранее заданного) числа переменных в каждом состоянии автомата, так и случай меняющегося числа переменных. Экспериментальное исследование показало применимость предложенного метода независимо от того, является ли число переменных постоянным. Время работы метода сравнимо с временем работы метода [1], однако доля качественных автоматов среди построенных для предложенного метода оказалось не такой высокой, как в [1].

Результаты настоящего проекта могут быть использованы для повышения степени автоматизации разработки программ, основанных на конечных автоматах. Речь при этом идет о случаях, когда могут быть записаны примеры желаемого управления рассматриваемым объектом. Объекты управления могут быть как простыми (перевернутый маятник), для которых управляющие системы традиционно разрабатываются на основе теории управления, так и более сложными: ими могут быть беспилотные вертолеты, другие беспилотные летательные аппараты, мобильные роботы. Другая потенциально возможная область использования результатов проекта – «обратная разработка» (reverse engineering) управляющих систем. Этот случай предполагает запись обучающих примеров непосредственно с результатов работы существующей системы.

Публикации

1. *Buzhinsky I.P., Ulyantsev V.I., Chivilikhin D.S., Shalyto A.A.* Inducing finite state machines from training samples using ant colony optimization // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2014. Vol. 53. No. 2. P. 256–266.
2. *Buzhinsky I.P., Chivilikhin D.S., Ulyantsev V.I., Tsarev F.N.* Improving the quality of supervised finite-state machine construction using real-valued variables // *GECCO '14 Companion Publication of the 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference*. 2014. P. 1039–1040.

Литература

1. *Buzhinsky I.P., Chivilikhin D.S., Ulyantsev V.I., Tsarev F.N.* Improving the quality of supervised finite-state machine construction using real-valued variables // GECCO '14 Companion Publication of the 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference. 2014. P. 1039–1040.
2. *Поликарпова Н.И., Шалыто А.А.* Автоматное программирование. СПб., 2011. – 176 с.
3. *Александров А.В., Казаков С.В., Сергушичев А.А., Царев Ф.Н., Шалыто А.А.* Применение эволюционного программирования на основе обучающих примеров для генерации конечных автоматов, управляющих объектами со сложным поведением // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. № 3. С. 85–100.



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

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ С ПОМОЩЬЮ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

А.С. Буздалова

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Введение

Эволюционные алгоритмы (ЭА) используются, как правило, для решения сложных задач однокритериальной, или скалярной, оптимизации [1]. Существуют различные способы повышения эффективности скалярной оптимизации, проводимой с помощью ЭА. Некоторые из них основаны на использовании вспомогательных критериев. Например, задача скалярной оптимизации может быть преобразована в задачу многокритериальной оптимизации путем разработки дополнительных критериев, обладающих определенными заранее заданными свойствами. Этот подход позволяет избежать остановки поиска решения в локальном оптимуме, а также повысить разнообразие особей эволюционного алгоритма, что положительным образом сказывается на эффективности его работы [2–4]. Однако создание дополнительных критериев не автоматизировано и является достаточно сложной творческой задачей.

В качестве источника вспомогательных критериев также может выступать предметная область [5]. В этом случае свойства критериев чаще всего заранее не известны, причем они могут меняться в зависимости от того, на каком этапе находится процесс оптимизации. Поэтому возникает задача выбора наиболее подходящего критерия, которую приходится решать вручную с помощью многократных запусков эволюционного алгоритма, что неэффективно. Таким образом, автоматизация использования вспомогательных критериев оптимизации, или (если пользоваться терминами теории эволюционных методов) вспомогательных функций приспособленности (ФП), представляется перспективным подходом.

Постановка задачи

Целью проекта является разработка метода повышения эффективности скалярной оптимизации с использованием вспомогательных критериев. Предполагается, что набор критериев задан заранее и об их свойствах ничего не известно. Таким образом, возникает

задача скалярной оптимизации со вспомогательными критериями. Задача решается с применением ЭА, настраиваемого во время выполнения с помощью обучения с подкреплением [6, 7].

Важно отметить, что в настоящей работе задача оптимизации самих вспомогательных критериев не ставится. В то же время, в традиционной теории многокритериальной оптимизации одинаково важны все критерии [8, 9]. В поставленной задаче должен быть оптимизирован только один целевой критерий.

Предлагаемый метод должен позволить выбирать из заранее подготовленного набора наиболее эффективную ФП для генерации каждого последующего поколения ЭА. В других существующих методах настройки ЭА обычно подбираются вещественные параметры фиксированной ФП, причем этот процесс освещен в литературе в меньшей степени, чем для иных параметров ЭА [10]. Таким образом, задача выбора наиболее эффективной ФП из заданного набора функций ставится впервые.

Новизна предлагаемого подхода заключается также в применении обучения с подкреплением для выбора ФП. В существующих работах, описывающих возможность использования такого обучения для настройки ЭА, рассматривается настройка только вещественных параметров, таких как, например, вероятность мутации или размер поколения [11, 12].

Описание предлагаемого метода EA+RL

Опишем предлагаемый метод выбора вспомогательных критериев ЭА (evolutionary algorithm, EA). Метод основан на обучении с подкреплением (reinforcement learning, RL). Будем называть предлагаемый метод EA+RL.

Пусть решается задача максимизации целевого критерия. Представим задачу выбора дополнительных критериев как задачу обучения с подкреплением [6, 7]. В качестве среды будем рассматривать эволюционный алгоритм. Применение действия соответствует выбору критерия из множества, состоящего из целевого и дополнительных критериев. Награда пропорциональна росту целевого критерия по сравнению с предыдущим поколением ЭА.

Опишем общую схему метода EA+RL. Агент обучения с подкреплением выбирает некоторый критерий, который передается ЭА. Выбранный критерий используется в ЭА для формирования следующего поколения. Далее вычисляются значения награды и состояния, которые передаются агенту, обновляющему оценку выгодности действий, и процесс повторяется до тех пор, пока не выполнится критерий останова. При работе с ЭА критерием останова чаще всего является достижение оптимума целевого критерия или превышение ограничения на число поколений. Схема метода EA+RL представлена на рис. 1.

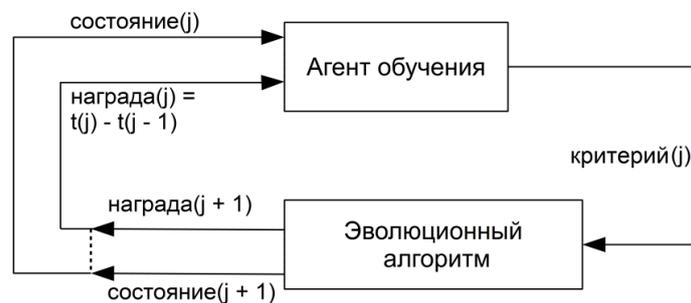


Рис. 1. Схема метода EA+RL: t – целевой критерий, j – номер итерации

В соответствии с алгоритмом обучения с подкреплением, агент выбирает критерии так, чтобы максимизировать суммарную ожидаемую награду, зависящую от роста целевого критерия. Таким образом, действия агента должны приводить к максимизации целевого критерия. Это позволяет не оптимизировать целевой критерий явно на каждой итерации, а использовать однокритериальный эволюционный алгоритм. Напомним, что некоторые

подходы, описанные во введении, вынуждены использовать многокритериальные алгоритмы, где одним из критериев оптимизации является целевой.

Для формализации понятия награды, введем некоторые обозначения. Пусть A – множество действий агента, $z \in Z$ – состояние среды. Тогда функция награды имеет вид $R: Z \times A \rightarrow \mathbb{R}$. Значения функции награды оцениваются с помощью информации о значениях мгновенной награды, получаемой агентом обучения после каждой итерации.

Множество действий агента соответствует множеству всех критериев оптимизации, включая дополнительные из множества H и целевой критерий t . Таким образом, $A = H \cup \{t\}$.

Обозначим i -е поколение как G_i . Применение действия агентом означает выбор некоторого критерия $f_i \in A$ в качестве ФП для поколения G_i .

Нашей задачей является определение функции награды R , значение которой вычисляется после выбора критерия f_i в состоянии z_{i-1} и формирования поколения G_i .

Награда должна быть тем выше, чем выше значение целевого критерия, полученного в результате применения соответствующего критерия оптимизации. В методе EA+RL могут использоваться различные функции награды, удовлетворяющие этому требованию.

Награду можно вычислять, основываясь на приспособленности лучшей особи или на средней приспособленности особей, составляющих поколение. Пусть $B(f, i)$ – наибольшее значение критерия f в поколении G_i . Тогда формула мгновенной награды в первом случае имеет следующий вид:

$$r(t, i) = \frac{B(t, i) - B(t, i - 1)}{B(t, i)} + k \sum_{f \in H} \frac{B(f, i) - B(f, i - 1)}{B(f, i)},$$

где $0 \leq k \leq 1$ – параметр.

Пусть x – особь эволюционного алгоритма. Приведем формулу мгновенной награды, основанной на средней приспособленности поколения:

$$r(t, i) = \frac{\sum_{x \in G_i} t(x) - \sum_{x \in G_{i-1}} t(x)}{\sum_{x \in G_i} t(x)} + k \sum_{f \in H} \frac{\sum_{x \in G_i} f(x) - \sum_{x \in G_{i-1}} f(x)}{\sum_{x \in G_i} f(x)},$$

где $0 \leq k \leq 1$ – параметр.

Параметр k в обоих случаях влияет на то, будут ли учитываться значения дополнительных критериев в награде. Ненулевое значение параметра k имеет смысл использовать в случаях, когда известно, что дополнительные критерии положительно коррелируют с целевым критерием. Однако чаще о свойствах критериев заранее не известно, в таких случаях рекомендуется использовать $k = 0$.

Одним из простейших способов задания состояния является использование единственного состояния. Этот подход наиболее эффективен в случаях, когда во время всего процесса оптимизации наиболее выгодным является один и тот же критерий. Состояние также можно определить как значение какого-либо из критериев, посчитанное на лучшей особи или усредненное для всех особей поколения. Подобный подход удобен для теоретического анализа и используется в следующем разделе. В случае, когда поколение состоит из одной особи, определение состояния таким образом позволяет получить Марковский процесс принятия решений [6]. В ходе ряда экспериментальных исследований показало свою эффективность определение состояния в виде вектора критериев, отсортированных по величине изменения их значений в двух последовательных поколениях. Как и для способов определения награды, для разных задач оказались эффективными разные способы определения состояния.

Теоретический анализ метода EA+RL

В рамках теоретических исследований получена асимптотическая оценка времени работы предлагаемого метода. Для модельной задачи, содержащей эффективный вспомогательный критерий, получено отношение времени работы предложенного метода ко

времени работы метода спуска со случайными мутациями, показывающее, что предложенный метод решает задачу не менее чем в раз быстрее, где k – параметр задачи. Анализ времени работы методов производился путем оценки вероятностей переходов в цепях Маркова (рис. 2). Таким образом, как и планировалось, удалось показать, что метод позволяет получать оптимальное значение целевой ФП за меньшее число ее вычислений, чем соответствующий эволюционный алгоритм.

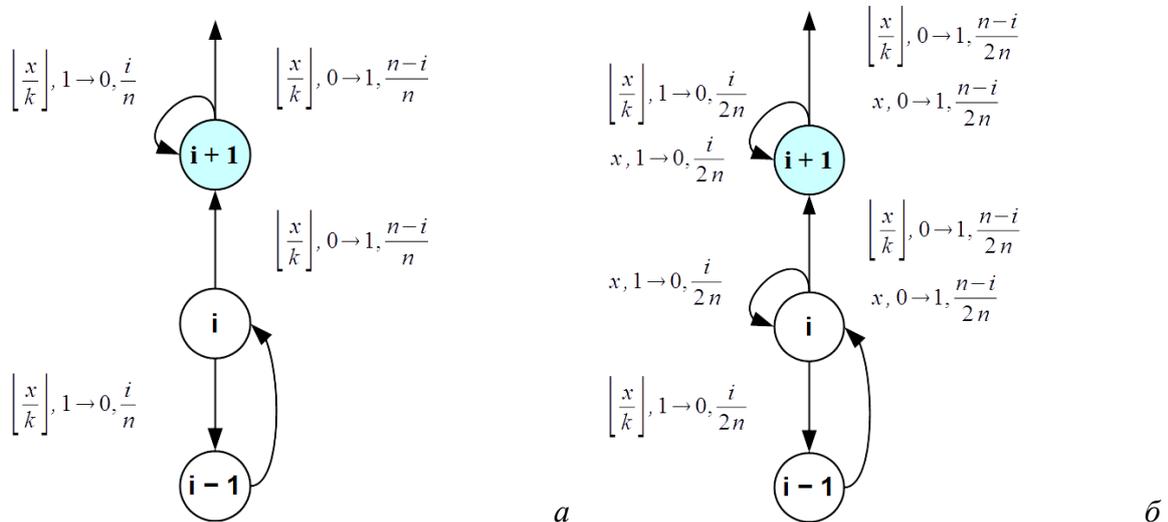


Рис. 2. Вероятности переходов: а – в методе спуска; б – в методе EA+RL; i – номер состояния, – целевой критерий, x – вспомогательный критерий

Практические результаты

Метод реализован в виде программного модуля, применимого к настройке любого эволюционного алгоритма, реализующего соответствующий интерфейс. Данный модуль предоставляет возможность выбора и настройки используемого алгоритма обучения. Для решения новой задачи оптимизации с помощью предлагаемого метода достаточно определить соответствующие ФП. Была подана заявка на регистрацию программы для ЭВМ «Программная библиотека для исследования и сравнения различных методов машинного обучения». Разработанный модуль встроен в данную программную библиотеку. Он был также апробирован при выборе эволюционных операторов.

Произведено сравнение предложенного метода с методами многокритериальной оптимизации на примере задачи коммивояжера. Как и ожидалось, предложенный метод позволил решить задачу эффективнее: для каждого рассмотренного экземпляра задачи за одно и то же число итераций эволюционного алгоритма получен обход меньшего веса, чем при применении многокритериальных алгоритмов.

Предложенный метод также использован для повышения эффективности генерации тестов против решений олимпиадных задач по программированию. Показано, что он позволяет решать поставленную задачу эффективнее, чем другие рассмотренные методы. Из вышеизложенного следует, что полученные результаты соответствуют заявленным.

Разработанный метод можно использовать для повышения эффективности решения задач оптимизации с помощью ЭА. Предполагается, что постановки этих задач уже содержат или позволяют легко составить набор вспомогательных ФП. Такая ситуация возникает, например, во время автоматической генерации тестов для олимпиадных задач [5]. Также многие задачи, интересные как с точки зрения теории оптимизации, так и с практической, обладают аддитивной целевой ФП, что позволяет получить вспомогательные ФП, представив целевую ФП как сумму вспомогательных. К таким задачам относятся, например, задачи коммивояжера [13], календарного планирования (job shop scheduling problem) [3] и задача о рюкзаке [14], являющиеся NP-полными. Эффективность решений этих задач, основанных на применении ЭА, может быть повышена с помощью разработанного метода.

Заключение

Разработан метод повышения эффективности ЭА с использованием вспомогательных критериев (ФП). Как теоретически, так и экспериментальным путем показано, что эффективность предложенного метода не ниже, чем эффективность работы ЭА. Более того, во всех рассмотренных случаях, эффективность ЭА под управлением предложенного метода возрастает. Метод обладает способностью переключаться с одной ФП на другую благодаря свойствам обучения с подкреплением, с помощью которого осуществляется выбор вспомогательных ФП. Таким образом, требования, которые предъявлялись к разрабатываемому методу, выполняются.

Публикации

1. *Buzdalova A.S., Kononov V.S., Buzdalov M.V.* Selecting evolutionary operators using reinforcement learning: initial explorations // GECCO '14 Companion Publication of the 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference. 2014. P. 1033–1038.
2. *Buzdalov M.V., Buzdalova A.S.* OneMax helps optimizing XdivK: Theoretical runtime analysis for RLS and EA+RL // GECCO '14 Companion Publication of the 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference. 2014. P. 201–202.

Литература

1. *Eiben A.E., Smith J.E.* Introduction to Evolutionary Computing. 2003. – 300 p.
2. *Knowles J.D., Watson R.A., Corne D.* Reducing local optima in single-objective problems by multi-objectivization // EMO '01 Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. 2001. P. 269–283.
3. *Jensen M.T.* Helper-objectives: Using multi-objective evolutionary algorithms for single-objective optimisation // Journal of Mathematical Modelling and Algorithms. 2004. Vol. 3. No 4. P. 323–347.
4. *Neumann F., Wegener I.* Can single-objective optimization profit from multiobjective optimization? // Multiobjective Problem Solving from Nature: From Concepts to Applications. 2008. P. 115–130.
5. *Buzdalov M.V., Buzdalova A.S.* Adaptive selection of helper-objectives for test case generation // 2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). 2013. P. 2245–2250.
6. *Николенко С.И., Тулупьев А.Л.* Самообучающиеся системы. М., 2009. – 288 с.
7. *Sutton R.S., Barto A.G.* Reinforcement learning: An introduction. Cambridge, MA, 1998. – 342 p.
8. *Лотов А.В., Поспелова И.И.* Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. М., 2008. – 197 с.
9. *Deb K.* Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. 2001. – 518 p.
10. *Eiben A.E., Michalewicz Z., Schoenauer M., Smith J.E.* Parameter control in evolutionary algorithms // Parameter Setting in Evolutionary Algorithms. 2007. P. 19–46.
11. *Müller S., Schraudolph N.N., Koumoutsakos P.D.* Step size adaptation in evolution strategies using reinforcement learning // Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. CEC '02. Vol. 1. 2002. P. 151–156.
12. *Eiben A.E., Horvath M., Kowalczyk W., Schut M.C.* Reinforcement learning for online control of evolutionary algorithms // Engineering Self-Organising Systems: 4th International Workshop, ESOA 2006, Hakodate, Japan, May 9, 2006, Revised and Invited Papers. 2007. P. 151–160.
13. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ. М., 2005. – 1296 с.

14. *Pisinger D.* Algorithms for knapsack problems: Ph.D. thesis. University of Copenhagen, Copenhagen, 1995. – 199 p.



Бутылкина Ксения Дмитриевна
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра прикладной и компьютерной оптики
e-mail: butylkinax@gmail.com

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ
 БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

К.Д. Бутылкина

Научный руководитель – доцент Г.И. Цуканова

В настоящее время большой интерес проявляется к исследованию пространств Вселенной, изучению процессов, протекающих в ней. Для решения такого рода задач создаются мощные телескопы, обладающие одновременно большой апертурой, широким полем зрения и высоким качеством изображения [1, 2]. По классификации астрономов таковыми являются обзорные телескопы [3, 4].

Для создания таких систем могут быть применены трехзеркальные системы с исправленными сферической абберацией, комой, астигматизмом и кривизной изображения (рис. 1). Радиусы и воздушные промежутки определяются из конструктивных соображений и условий устранения кривизны изображения.

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_4 = -1$$

$$f' = -1$$

$$h_1 = 1$$

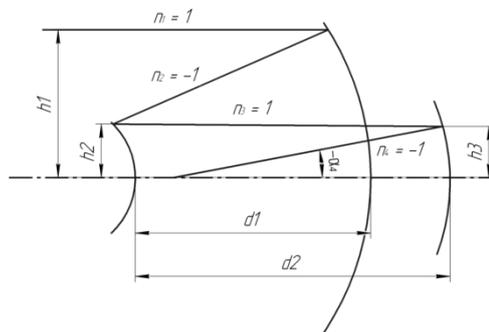


Рис.1. Принципиальная оптическая схема исследуемого объектива

Условие устранения кривизны изображения:

$$\alpha_2 - \frac{\alpha_3 + \alpha_2}{h_2} + \frac{\alpha_4 + \alpha_3}{h_3} = 0$$

где α – углы нулевых лучей с оптической осью, h – высоты нулевых лучей на главных плоскостях.

Параметрами для исправления сферической абберации, комы и астигматизма являются коэффициенты деформации зеркал. Для выполнения расчета составляется система уравнений из коэффициентов аббераций третьего порядка. Ее решение позволяет определить квадраты эксцентриситетов зеркал:

$$\sigma_1 = \frac{2S_2 + 2S_3 - 8a}{S_2 S_3 \alpha_2^3} - 1,$$

$$\sigma_2 = \frac{2S_3 - 8a}{h_2 S_2 (S_3 - S_2) (\alpha_3 + \alpha_2)^3} - \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{(\alpha_3 + \alpha_2)^2},$$

$$\sigma_3 = \frac{2S_2 - 8a}{h_3 S_3 (S_3 - S_2) (\alpha_4 + \alpha_3)^3} - \frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{(\alpha_4 + \alpha_3)^2},$$

$$\text{где } S_2 = \frac{-d_1}{h_2}, \quad S_3 = \frac{d_2}{h_2 h_3}, \quad a = \frac{1}{2} [S_2(\alpha_3^2 - \alpha_2^2) + S_3(\alpha_4^2 - \alpha_3^2)],$$

где d_1 – расстояние между первым и вторым зеркалами; d_2 – расстояние между вторым и третьим зеркалами.

С помощью данных формул создается ряд исходных систем (порядка 250). Далее проводится их анализ, в результате которого выбираются наиболее удачные конструкторские решения. Системы с большими межосевыми расстояниями громоздки и неудобны, более удачным решением будут системы, в которых расстояния между первым и вторым зеркалами и между вторым и третьим зеркалами приблизительно равны. Желательно также, чтобы изображение не находилось в промежутке между зеркалами, а было вынесено за вершину вторичного зеркала.

При разработке объективов мало добиться исправления аберраций, так как можно получить безаберрационные системы, в которых будет невозможно защитить плоскость изображения от постороннего света или они будут иметь большое экранирование [5].

Экранирование в трехзеркальных системах может быть двух видов: не зависящее от относительного отверстия и углового поля и зависящее от них.

Экранирование первого вида могут вызывать следующие элементы:

- второе зеркало;
- третье зеркало, если оно расположено между первым и вторым (рис. 2), так как лучи, отраженные от первого зеркала, могут экранироваться третьим зеркалом. Коэффициент экранирования η определяется по выражению:

$$\eta = \frac{d_1 h_2}{h_2 d_1 - (1 - h_2) d_2};$$

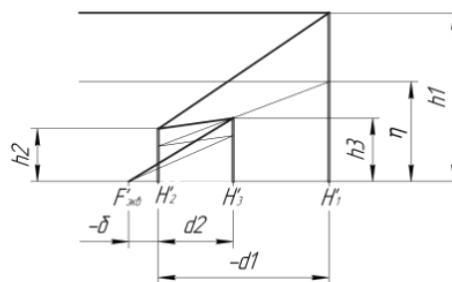


Рис. 2. Экранирование, вызываемое третьим зеркалом

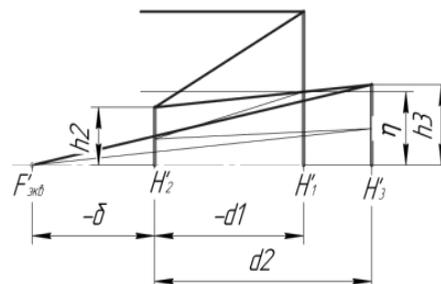


Рис. 3. Экранирование, вызываемое отверстием в главном зеркале

– отверстие в главном зеркале, если между вторым и третьим зеркалами расходящийся ход лучей (рис. 3). Коэффициент экранирования, вызываемый отверстием в главном зеркале, определяется по формуле:

$$\eta = h_2 + \frac{h_2 - h_3}{d_2} d_1;$$

– отверстие во втором зеркале (рис. 4). Коэффициент экранирования определяется по формуле:

$$\eta = \frac{-\delta}{h_2}.$$

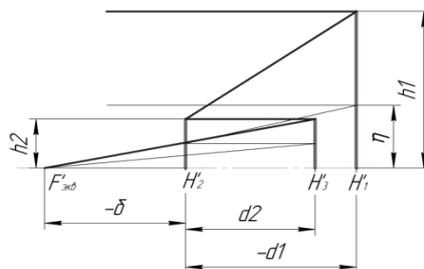


Рис. 4. Экранирование, вызываемое отверстием во втором зеркале

Экранирование, зависящее от относительного отверстия и углового поля, определяется с учетом защиты от постороннего света. В системе проводился расчет защитных бленд.

На плоскость изображения может попасть следующий посторонний свет:

- отраженный только от третьего зеркала (рис. 5).

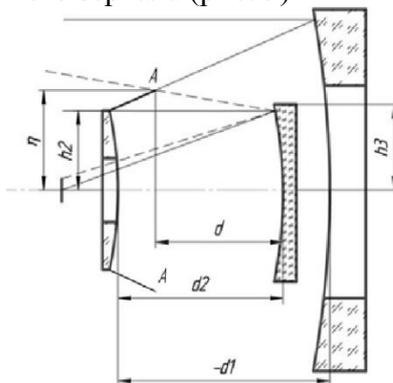


Рис. 5. Защита плоскости изображения от постороннего света, отраженного только от третьего зеркала

Коэффициент экранирования, зависящий от относительного отверстия и углового поля, определяется по формуле:

$$\eta = \tan \omega \frac{2kd}{h_2} + h_3,$$

где k – диафрагменное число; d – расстояние от края бленды у второго зеркала до апертурной диафрагмы (АД); ω – угловое поле системы;

- отраженный только от первого зеркала (может быть срезан блендой, установленной у главного зеркала) (рис. 6). Была определена длина защитной бленды ВВ:

$$L = \frac{h_1 - H}{\tan \alpha}.$$

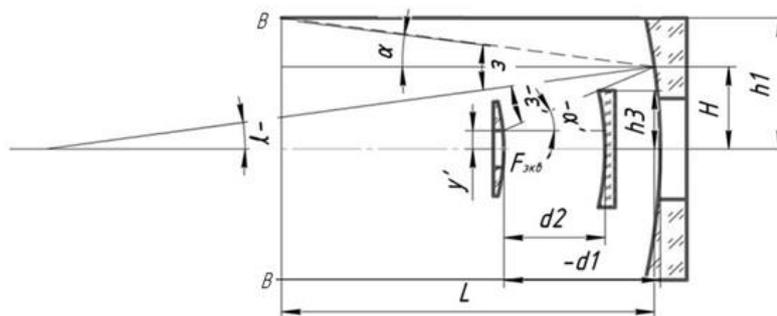


Рис. 6. Защита плоскости изображения от постороннего света, отраженного только от первого зеркала

С помощью полученных формул определены коэффициенты экранирования для отобранных ранее систем. Для дальнейшего исследования оставлены системы, у которых коэффициент экранирования по диаметру с учетом углового поля, диафрагменного числа и защиты плоскости изображения от постороннего света не превышает значения $\eta \leq 0,55$ (Табл. 1).

После анализа исходных систем по конструктивным данным проводился их абберационный расчет при одинаковых характеристиках: угловое поле 3° , относительное отверстие 1:1,7 и фокусное расстояние 1200 мм. В системах данного типа входной зрачок не может быть расположен на главном зеркале, так как в этом случае невозможно обеспечить защиту от постороннего света (большой диаметр третьего зеркала). Апертурная диафрагма располагается на третьем зеркале, если оно находится в промежутке между первым и вторым зеркалами, или в отверстии первого зеркала, если третье находится вне этого промежутка. При дальнейшем исследовании систем были приняты эти условия.

Для светосильных систем (относительное отверстие более 1:2) использование только поверхностей второго порядка не дает хорошего качества изображения. В связи с этим поверхности первого и второго зеркал второго порядка заменены на асферические поверхности высшего порядка. Для двух систем приведены результаты расчета.

Первая система. Оптические характеристики (рис. 7):

- фокусное расстояние 1200 мм;
- относительное отверстие 1:1,4;
- угловое поле $2\omega = 2^\circ$.

Конструктивные параметры системы представлены в Табл. 1, а оптическая схема на рис. 7.

Таблица 1

Конструктивные параметры первой системы

N	r	d	h
1	-1256,35*	-345,5	420,04
2	-565,36**	480,0	194,61
3	-1080,00***		198,619

Уравнения поверхностей:

$$* x^2 + y^2 = -2512,693848z + 0,408157z^2 - 0,0004235z^3;$$

$$** x^2 + y^2 = -1130,713867z + 0,85968z^2 - 0,0008608z^3;$$

$$*** e_3^2 = -2160z - 0,191035z^2.$$

Для этой системы возникают проблемы с коррекцией aberrаций на краю поля, но можно получить хорошее качество изображения при большем относительном отверстии 1:1,4 и меньшем размере углового поля 2° .

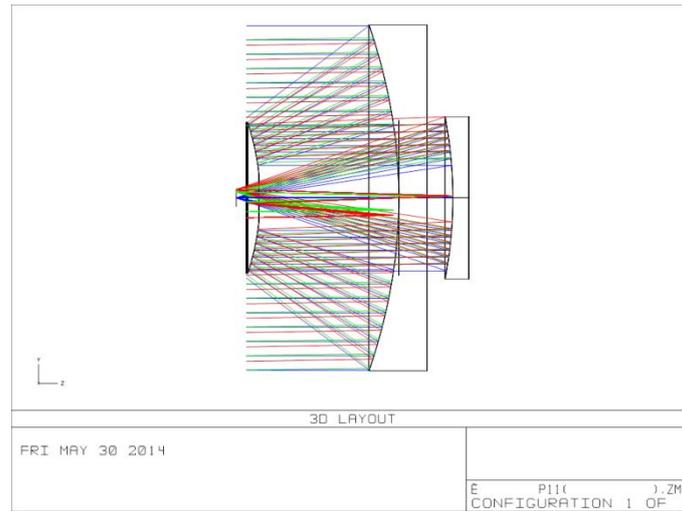


Рис. 7. Оптическая схема объектива с $f'=1200$ мм, $2\omega = 2^\circ$, относительное отверстие 1:1,4

Вторая система. Оптические характеристики (рис. 8):

- фокусное расстояние 1200 мм;
- угловое поле $2\omega = 3^\circ$;
- относительное отверстие 1:1,67.

Конструктивные параметры системы представлены в Табл. 2, а оптическая схема на рис. 8.

Таблица 2

Конструктивные параметры второй системы

N	r	d	h
1	-1563,762*	-469,25	718,374
2	-587,372**	480,00	290,722
3	-960,000***		322,262

Уравнения поверхностей:

$$* x^2 + y^2 = -3127,524414z + 0,385358z^2 - 0,00033344z^3;$$

$$** x^2 + y^2 = -1174,74485z + 0,419791z^2 - 0,0003039z^3;$$

$$*** x^2 + y^2 = -1920z - 0,8044444z^2.$$

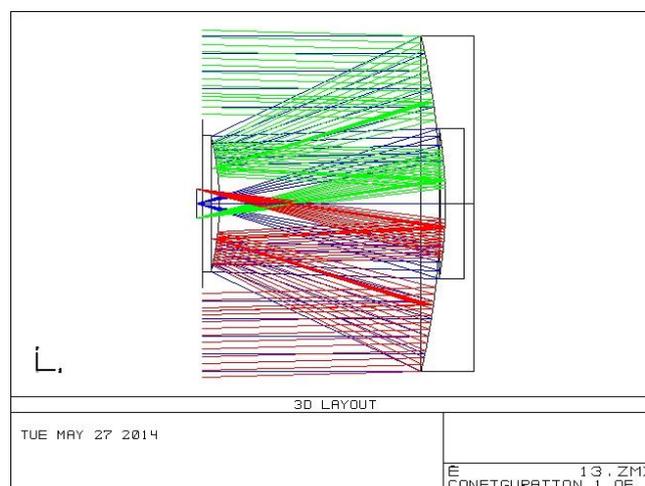


Рис. 8. Оптическая схема отобранной системы

Вторая система больше подходит в качестве исходной для светосильного широкоугольного объектива телескопа. Для нее проведена оптимизация по средней

квадратичной деформации (СКВ) волнового фронта. Данная система даже при одной асферической поверхности высшего порядка имела неплохое качество изображения (СКВ = 0,111 для $\lambda = 0,546$ мкм, то есть величина aberrаций не превышает допустимую), однако при двух асферических поверхностях СКВ = 0,09 для $\lambda = 0,546$ мкм. Частотно-контрастная характеристика для частоты 100 лин/мм равна 0,5 (приемник 5x5 пикселей), на частоте 84 лин/мм – 0,56 (приемник 6x6 пикселей). Контраст 0,4 достигается на частоте 134 лин/мм (удовлетворительным считается контраст 0,4 на частоте 80 лин/мм). Таким образом, для данной системы качество изображения можно считать хорошим.

В системе нет необходимости добиваться дифракционного качества изображения. Достаточно, чтобы она могла работать с приемником, имеющим размеры пикселей порядка 6–10 мкм. Таким образом, качество полученной системы хорошее.

Заключение

- Проведен аналитический обзор зеркальных систем телескопов, выбрана стартовая схема;
- выведены формулы для расчета и исследования систем в области aberrаций третьего порядка с устранением сферической aberrации, комы, астигматизма, кривизны изображения;
- выполнен габаритный и aberrационный расчет 250 исходных систем (с помощью Microsoft Excel);
- получены выражения для определения коэффициентов экранирования в трехзеркальных системах без промежуточного изображения, диаметров и длин бленд, защищающих плоскость изображения от постороннего света;
- для двух систем с разными оптическими характеристиками выполнена оптимизация и анализ качества изображения.

Литература

1. *Теребиж В.Ю.* Современные оптические телескопы. М., 2005. – 80 с.
2. *Денисенко С.А., Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Папушев П.Г.* Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 48–51.
3. *Цуканова Г.И.* Классификация трехзеркальных объективов // 31 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Technische Hochschule Ilmenau. 1986. No 3. P. 225.
4. *Чуриловский В.Н.* Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л., 1968. – 312 с.
5. *Цуканова Г.И.* Исследование экранирования, виньетирования и aberrаций высших порядков в трехзеркальных плананастигматах // Оптико-механическая промышленность. 1991. № 3. С. 37–40.



Вишератина Анастасия Константиновна
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: nastitoropova@yandex.ru

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИОСОВМЕСТИМЫХ КОМПЛЕКСОВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК И ХЛОРИНА e6

А.К. Вишератина

Научный руководитель – доцент А.О. Орлова

Введение

Создание наноструктурированных систем для биологии и медицины является одним из перспективных направлений развития науки [1]. К нему относится и разработка комплексов на основе полупроводниковых коллоидных квантовых точек и тетрапиррольных молекул [2]. Последние сегодня успешно используются для диагностики и фотодинамической терапии онкологических заболеваний, однако разработка их усовершенствованных соединений остается актуальной задачей [3]. Квантовые точки (КТ) являются полупроводниковыми нанокристаллами, обладающими такими уникальными оптическими свойствами, как высокая поглощательная способность, высокий квантовый выход люминесценции и высокая фотостабильность [4]. Благодаря этому привлекательна идея их использования в качестве эффективных доноров энергии фотовозбуждения в комплексах с тетрапиррольными молекулами. При этом перенос энергии от КТ к тетрапиррольным молекулам позволит расширить диапазон фотовозбуждения тетрапиррольной молекулы и, как следствие, увеличить генерацию синглетного кислорода тетрапиррольным соединением [5]. Следует также отметить, что нанометровые размеры КТ позволяют одновременно использовать их в качестве донора энергии и доставщика нескольких тетрапиррольных молекул в раковые клетки, что позволяет ожидать значительного увеличения фотодинамического эффекта.

В настоящей работе в водных растворах были сформированы комплексы малотоксичных безкадмиевых КТ сульфида цинка, допированных ионами марганца (ZnS:Mn), с хлорином e6 (Ce6) и исследованы их фотофизические свойства.

Материалы и метод

Были использованы КТ ZnS:Mn, полученные методом высокотемпературного металлоорганического синтеза [6]. Коэффициент экстинкции КТ на длине волны пика экситонного поглощения составляет $\varepsilon_{300} = 2,75 \cdot 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Для получения водорастворимых КТ была проведена процедура их фазового переноса из органической фазы (хлороформа) в водную путем замещения молекул солилизатора на поверхности КТ на цистеамин [7].

В качестве тетрапиррольной молекулы был использован основной компонент препарата для фотодинамической терапии «Фотодитазин» – N-диметилглюкаминная соль хлорина e6 [8].

К раствору КТ порционно добавлялись микроколичества водного раствора хлорина e6 для исследования зависимости фотофизических свойств комплексов КТ/Ce6 от их стехиометрии.

Результаты и обсуждение

Спектры поглощения и люминесценции растворов ZnS:Mn КТ в дистилляте приведены на рис. 1. Край первой полосы поглощения КТ находится в области 300 нм. В результате

переноса энергии на примесные ионы Mn^{2+} собственная люминесценция КТ полностью потушена [9], при этом наблюдается фосфоресценция марганца в области 590 нм [10].

Спектры поглощения, люминесценции и структурная формула хлорина еб приведены на рис. 2. Спектр люминесценции КТ достаточно хорошо перекрывается со спектром поглощения Себ, поэтому в случае создания комплексов КТ ZnS:Mn с Себ в них может быть осуществлен высокоэффективный перенос энергии от КТ к молекулам хлорина еб [11].

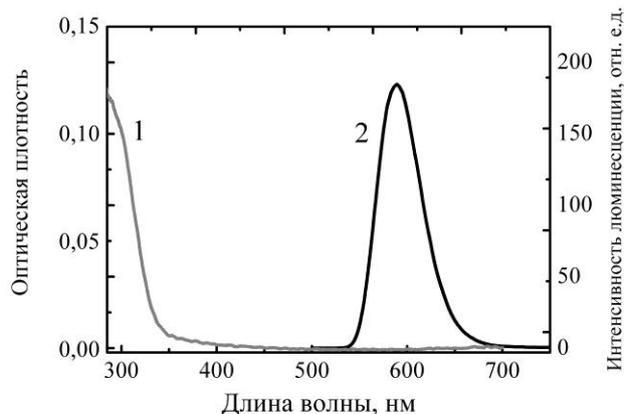


Рис. 1. Спектры водного раствора КТ:
1 – спектр поглощения; 2 – спектр люминесценции (возбуждение светом с длиной волны 300 нм)

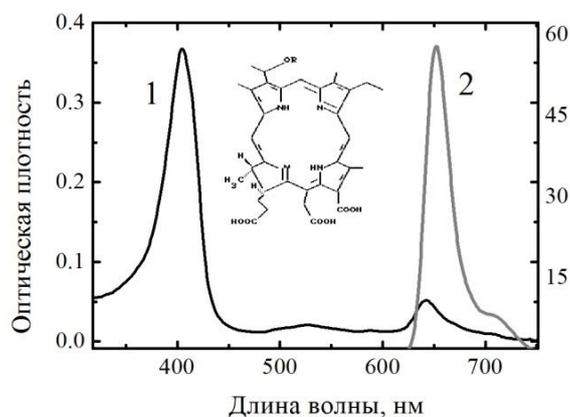


Рис. 2. Спектры водного раствора Себ:
1 – спектр поглощения; 2 – спектр люминесценции. Возбуждение люминесценции осуществлялось светом с длиной волны 400 нм

В случае ZnS:Mn КТ, солубилизированных молекулами цистеина, и хлорина еб формирование комплексов происходит в результате электростатического взаимодействия аминогрупп цистеина с карбоксильными группами Себ при смешивании водных растворов данных компонентов. Из рис. 3 видно, что добавление раствора Себ к раствору КТ в дистилляте приводит к длинноволновому смещению первой полосы поглощения хлорина еб и к появлению в его спектре поглощения новой полосы в области 500 нм. Данное изменение спектра поглощения водного раствора хлорина еб свидетельствует о диссоциации димеров Себ в результате электростатического взаимодействия его карбоксильных групп с аминогруппой цистеина на поверхности КТ.

На рис. 4 приведены спектры люминесценции водного раствора КТ до и после добавления к нему раствора хлорина еб. Эта процедура приводит к ~ 40 % уменьшению интенсивности люминесценции КТ и возникновению полосы люминесценции с максимумом 670 нм, которая соответствует люминесценции хлорина еб, связанного в комплекс с КТ.

Анализ спектров поглощения и люминесценции Себ, приведенных на рис. 3 и 4, показал, что в сформированных комплексах КТ/Себ наблюдается эффективный перенос энергии от КТ к молекулам хлорина еб.

В отличие от большинства органических молекул, КТ может одновременно присоединить к себе достаточно много молекул. В этом случае число молекул акцептора, приходящихся в комплексе на один донор, подчиняется распределению Пуассона [11]. В случае полного тушения люминесценции КТ в комплексах с молекулами это приводит к экспоненциальной зависимости интенсивности люминесценции донора (КТ) от концентрации акцептора в смеси [12-13]. Анализ интенсивности люминесценции ZnS:Mn КТ при различных концентрациях хлорина еб показал, что в данных комплексах наблюдается практически линейная зависимость тушения люминесценции донора от относительной концентрации акцептора, что проиллюстрировано на рис. 5.

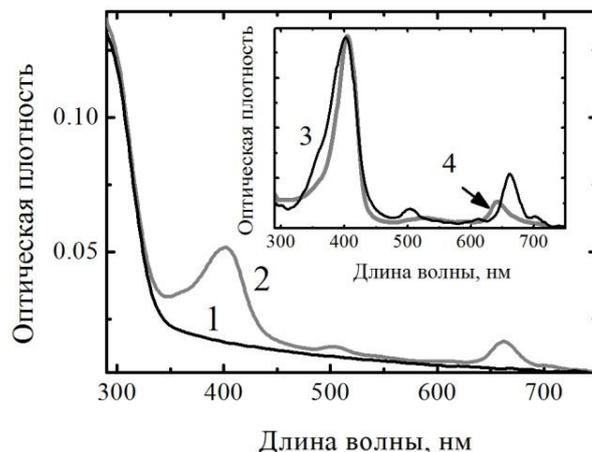


Рис. 3. Спектры поглощения: 1 – КТ; 2 – комплексов КТ с Себ. На вставке приведены спектры поглощения свободного Себ, а также спектр его поглощения в комплексе с КТ. Последний был получен путем вычитания спектра поглощения КТ (кривая 1) из спектра поглощения смеси КТ и Себ (кривая 2)

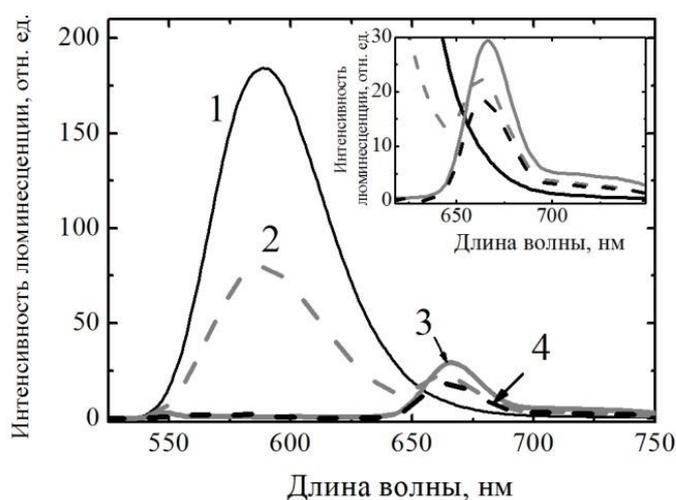


Рис. 4. Спектры люминесценции: 1, 2 – ZnS:Mn КТ до и после смешивания с раствором Себ (возбуждение светом с длиной волны 300 нм); 3 – смешанный раствор КТ с Себ (возбуждение светом с длиной волны 400 нм); 4 – спектр люминесценции Себ, полученный в результате вычитания спектра люминесценции КТ из зарегистрированного спектра люминесценции смешанного раствора (кривая 2)

При этом исследование кинетики затухания фосфоресценции марганца у данных КТ в комплексе с Себ показало наличие зависимости характеристического времени затухания фосфоресценции от концентрации Себ. Это указывает на неполное тушение люминесценции КТ в комплексах с хлорином еб и может являться причиной появления линейной зависимости в кривой затухания люминесценции донора в области низких концентраций акцептора. Следует отметить, что наблюдаемое нами неполное тушение люминесценции КТ в комплексах с тетрапиррольным компонентом является абсолютно нехарактерным для комплексов КТ/тетрапиррол, в которых перенос энергии осуществляется непосредственно между экситонным уровнем КТ и соответствующим резонансным электронным уровнем у молекул. Для выяснения физических механизмов, приводящих к неполному тушению примесной люминесценции КТ в комплексах с Себ, необходимо проведение дальнейших исследований.

Согласно проведенным оценкам эффективность внутрикомплексного переноса энергии от КТ к хлорину еб составляет порядка 40 % и практически не зависит от концентрации хлорина еб в смеси с КТ (рис. 6, линия 1). Наблюдаемая столь высокая эффективность внутрикомплексного переноса энергии в данном случае выгодно отличает комплексы на основе КТ сульфида цинка от аналогичных комплексов КТ/Себ, полученных ранее с участием КТ селенида кадмия [14], в которых эффективность переноса не превышала 6 %.

В то же время, как видно из рис. 6, квантовый выход люминесценции хлорина еб, обусловленный его собственным поглощением, заметно уменьшается при увеличении концентрации Себ в смешанном растворе.

Следует отметить, что наблюдаемая в данном случае зависимость квантового выхода люминесценции Себ, связанного в комплекс с КТ, от его относительной концентрации в смешанном растворе аналогична его поведению в комплексах с КТ на основе селенида кадмия [2].

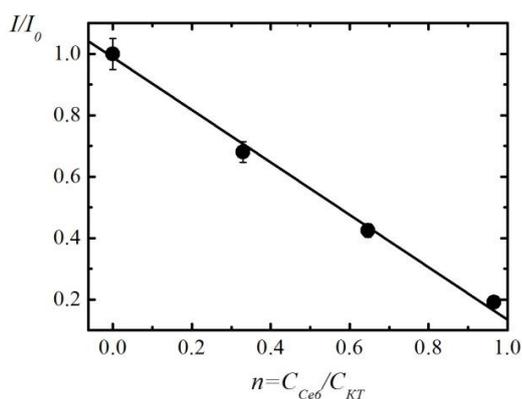


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности люминесценции КТ от соотношения концентраций $C_{\text{Себ}}/C_{\text{КТ}}$

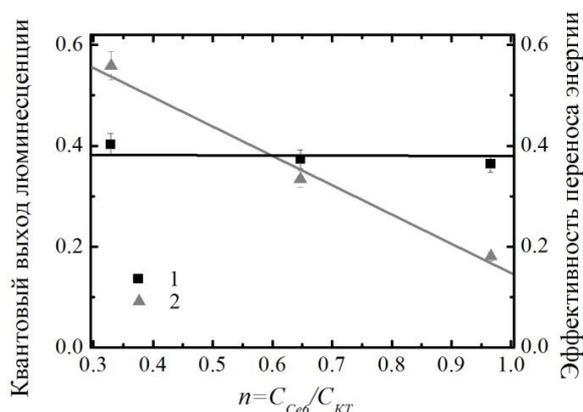


Рис. 6. Зависимости эффективности переноса энергии (1) и квантового выхода люминесценции Себ (2) от соотношения концентраций $C_{\text{Себ}}/C_{\text{КТ}}$

Заключение

В результате электростатического взаимодействия были сформированы новые комплексы на основе КТ сульфида цинка допированных ионами марганца и молекул хлорина еб. Показано, что в комплексах наблюдается перенос энергии фотовозбуждения от КТ к молекулам Себ, величина которого составляет ~ 40 % и не зависит от концентрации молекул Себ в смешанном растворе. В то же время показано, что увеличение концентрации Себ в образцах приводит к падению квантового выхода люминесценции Себ, связанного в комплекс с КТ. Отметим, что данное поведение хлорина еб в комплексах с ZnS:Mn КТ аналогично его поведению в комплексах с CdSe/ZnS КТ. Полученные данные свидетельствует о перспективности использования ZnS:Mn КТ/Себ комплексов в качестве нового фотосенсибилизатора для фотодинамической диагностики и терапии онкологических заболеваний. В продолжение работы предполагается исследовать зависимость фотодинамического эффекта от применения ZnS:Mn КТ/Себ комплексов в клеточных культурах.

Публикации

1. Вишератина А.К., Мартыненко И.В. Исследование биосовместимых комплексов квантовых точек ZnS, допированных ионами Mn^{2+} , с хлорином еб // Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных. Вып. 2. СПб., 2014. С. 322–324.
2. Visheratina A.K., Martynenko I.V. Investigation of intracomplex energy transfer in systems with semiconductor quantum dots and tetrapyrrole molecule // Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных. Вып. 4. СПб., 2014. С. 307–308.

3. Вишератина А.К., Мартыненко И.В., Орлова А.О. Исследование условий формирования и стабильности комплексов на основе квантовых точек ZnS, допированных ионами Mn²⁺, с молекулами хлорина е6 // Лазеры. Измерения. Информация: Труды конференции 9–11 июня 2014 года. СПб., 2014 С. 121–122.
4. Martynenko I.V., Orlova A.O., Visheratina A.K., Bakanov A.V., Maslov V.G., Fedorov A.V., Gun'ko Y.K., Baranov A.V. The influence of sulfonation of the phthalocyanine molecules on energy transfer efficiency in complexes with quantum dots // 2014 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2014). 2014. P. 96–97.
5. Visheratina A.K., Orlova A.O., Martynenko I.V., Maslov V.G., Fedorov A.V., Gun'ko Y.K., Baranov A.V. Quenching of manganese-doped ZnS quantum dots in biocompatible complexes with chlorin e6 // 2014 International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW 2014). P. 112–113.
6. Visheratina A.K., Martynenko I.V., Orlova A.O., Maslov V.G., Fedorov A.V., Baranov A.V., Gun'ko Y.K. Investigation of biocompatible complexes of Mn²⁺-doped ZnS quantum dots with chlorin e6 // Journal of Optical Technology. 2014. Vol. 81. No 8. P. 444–448.

Литература

1. Aguilar Z. Nanomaterials for medical applications. 2012. – 544 p.
2. Maslov V.G., Orlova A.O., Baranov A.V. Combination therapy: Complexing of QDs with tetrapyrroles and other dyes // Photosensitizers in Medicine, Environment, and Security. 2012. P. 351–389.
3. Mishra A.K. Nanomedicine for drug delivery and therapeutics. 2013. – 536 p.
4. Efros A.L., Lockwood D.J., Tsybeskov L. Semiconductor nanocrystals: From basic principles to applications. 2003. – 263 p.
5. Duong H.D., Rhee J.I. Singlet oxygen production by fluorescence resonance energy transfer (FRET) from green and orange CdSe/ZnS QDs to protoporphyrin IX (PpIX) // Chemical Physics Letters. 2011. Vol. 501. No 4–6. P. 496–501.
6. Yang P., Bredol M. Surface passivation and photoluminescence of Mn-doped ZnS nanocrystals // Research Letters in Materials Science. 2008. Vol. 2008. P. 1–6.
7. Tohgha U., Deol K.K., Porter A.G., Bartko S.G., Choi J.K., Leonard B.M., Varga K., Kubelka J., Muller G., Balaz M. Ligand induced circular dichroism and circularly polarized luminescence in CdSe quantum dots // ACS Nano. 2013. Vol. 7. No 12. P. 11094–11102.
8. Vassiliev D.V., Stukov A.N. Enhancing photoditazine-mediated photodynamic therapy of tumours // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 5973. P. 59730D.
9. Chen H.-Y., Maiti S., Son D.H. Doping location-dependent energy transfer dynamics in Mn-doped CdS/ZnS nanocrystals // ACS Nano. 2012. Vol. 6. No 1. P. 583–591.
10. Cao S., Zheng J., Zhao J., Wang L., Gao F., Wei G., Zeng R., Tian L., Yang W. Highly efficient and well-resolved Mn²⁺ ion emission in MnS/ZnS/CdS quantum dots // Journal of Materials Chemistry C. 2013. Vol. 1. No 14. P. 2540–2547.
11. Lakowicz J.R. Principles of fluorescence spectroscopy. 2007. – 980 p.
12. Orlova A.O., Martynenko I.V., Maslov V.G., Fedorov A.V., Gun'ko Y.K., Baranov A.V. Investigation of complexes of CdTe quantum dots with the AlOH-sulphophthalocyanine molecules in aqueous media // The Journal of Physics Chemistry C. 2013. Vol. 117. No 4. P. 23425–23431.
13. Орлова А.О., Адрианов В.Е., Маслов В.Г., Парфенов П.С., Баранов А.В., Федоров А.В. Фотофизические проявления взаимодействия квантовых точек с молекулами орто-фенантролина // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108. № 6. С. 983–989.
14. Martynenko I.V., Orlova A.O., Maslov V.G., Baranov A.V., Fedorov A.V., Artemyev M. Energy transfer in complexes of water-soluble quantum dots and chlorin e6 molecules in different environments // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2013. Vol. 4. P. 895–902.



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

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КАСКАДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

П.А. Гриценко

Научный руководитель – старший научный сотрудник С.В. Арановский

Решается задача повышения точности идентификации частоты зашумленного синусоидального сигнала.

В результате исследований был получен новый метод повышения точности идентификации частоты, основанный на каскадной схеме фильтрации. Ее преимуществом является получение в общем случае оценки частоты сигнала, точность которой заметно превышает оценки, полученные без применения предлагаемой схемы.

Задача компенсации помех и возмущений является не только фундаментальной проблемой теории управления, но и актуальной прикладной задачей [1, 2]. Действительно, большинство промышленных объектов управления подвержены действию внешних возмущений, например вибраций. Зачастую возмущения, которые испытывают системы управления, являются периодическими функциями времени. Так, в жестких дисках компьютера для повышения плотности записи информации применяются методы компенсации вибраций, действующих на считывающую головку [3]. Аналогичным образом, вращающийся двигатель вертолета является источником периодического шума и вибраций [4]. Периодические возмущения встречаются также во множестве других инженерных приложений.

Одним из подходов к компенсации возмущений является непрямой адаптивный метод. Использование его предполагает точное знание частоты возмущающего воздействия. Как правило, на практике такая информация отсутствует или же частота возмущения меняется в ходе функционирования системы. При этом нередко использование датчиков измерения частоты является невозможным ввиду технических или экономических причин. В таких ситуациях возникает задача определения частоты гармонического сигнала, причем качество компенсации напрямую зависит от точности идентификации частоты. Задача идентификации значительно усложняется в условиях реальных шумов измерений, которые могут привести к появлению смещения или осцилляции вокруг среднего значения оценки частоты. Таким образом, актуальной задачей является разработка методов повышения точности идентификации частоты синусоидального сигнала в условиях шумов.

Известно множество подходов к решению этой задачи [5–10]. Целью настоящей статьи является разработка метода повышения точности получаемых при идентификации оценок. Предлагаемый метод представляет собой схему каскадной фильтрации сигнала, позволяющую существенно снизить влияние шумов и тем самым повысить точность оценивания частоты для широкого класса методов идентификации.

Разработанная схема функционирования предлагаемого метода приведена на рис. 1.

В статье осуществлено моделирование предложенной схемы каскадов для нескольких алгоритмов идентификации, описанных в работах [6–8]. Для ошибок идентификации частоты и каждого из рассматриваемых алгоритмов идентификации оцениваются две количественные характеристики: математическое ожидание E и дисперсия V .

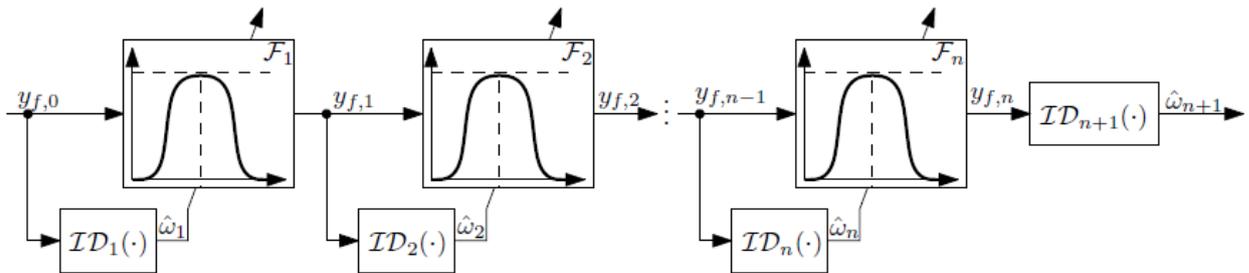


Рис. 1. Каскадная схема адаптивных полосовых фильтров

Полученные результаты показывают, что в случае зашумленного входного сигнала каскад адаптивных фильтров может значительно улучшить качество идентификации, уменьшить отклонение и дисперсию установившейся ошибки.

Заключение

В работе была рассмотрена проблема идентификации частоты синусоидального сигнала и предложено использовать схему, состоящую из адаптивного каскада полосовых фильтров в сочетании с реализацией алгоритмов идентификации. Настоящая схема значительно улучшает качество идентификации, существенно снижает ожидаемое значение установившейся ошибки и дисперсию. Полученные результаты исследований могут внести научный вклад в область синтеза систем управления, направленных на компенсацию периодических возмущений, в особенности в условиях существенных шумов измерений, что является неизбежным при работе с реальными системами, такими как системы управления роботами, космическим оборудованием, электрическими двигателями и двигателями внутреннего сгорания, системы передачи информации, системы прогнозирования траекторий ограниченно наблюдаемых движущихся объектов, в индустрии производства жестких дисков и т.п. Результаты предлагаемых исследований могут иметь практическую значимость при решении задач активной виброзащиты.

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.

Литература

1. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М., 2002. – 303 с.
2. Цыкунов А.М. Компенсация возмущений и помех в системах с измеряемым вектором состояния // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ. 2012. № 2. С. 67–76.
3. Sacks A., Bodson M., Khosla P. Experimental results of adaptive periodic disturbance cancellation in a high performance magnetic disk drive // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1996. Vol. 118. No 3. P. 416–424.
4. Bittanti S., Moiraghi L. Active control of vibrations in helicopters via pole assignment techniques // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1994. Vol. 2. No 4. P. 343–351.
5. Wu B., Bodson M. A magnitude/phase-locked loop approach to parameter estimation of periodic signals // IEEE Transactions on Automatic Control. 2003. Vol. 48. No 4. P. 612–618.
6. Aranovskiy S.V., Bobtsov A.A., Kremlev A.S., Nikolaev N.A., Slita O.V. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. 2010. Vol. 16. No 2. P. 129–139.

7. Fedele G., Ferrise A. Non adaptive second-order generalized integrator for identification of a biased sinusoidal signal // IEEE Transactions on Automatic Control. 2012. Vol. 57. No 7. P. 1838–1842.
8. Mojiri M., Bakhshai A.R. An adaptive notch filter for frequency estimation of a periodic signal // IEEE Transactions on Automatic Control. 2004. Vol. 49. No 2. P. 314–318.
9. Xia X. Global frequency estimation using adaptive identifiers // IEEE Transactions on Automatic Control. 2002. Vol. 47. No 7. P. 1188–1193.
10. Elliott S., Nelson P. Active noise control // IEEE Signal Processing Magazine. 1993. Vol. 10. No 4. P. 12–35.



Громов Владислав Сергеевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: vgromov@niuitmo.ru

АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В.С. Громов

Научный руководитель – доцент А.А. Пыркин

Цель данного проекта заключается в разработке системы управления робототехнической системой на примере модели роботизированного судна для удержания желаемых координат при наличии внешних гармонических возмущающих воздействий, а также нелинейности и запаздывания в канале управления.

Надводное судно является наглядным примером сложной технической системы, функционирующей в условиях нестационарной внешней среды. Возмущения различной природы и происхождения воздействуют на судно, находящееся в открытом море. Выделяют три типа возмущений, которые существенно влияют на качество управления: течения, волновые и ветровые воздействия. Система автоматического управления движением судна должна решать различные задачи: динамическое позиционирование в точке, стабилизация продольной и поперечной скоростей, стабилизация курса, движение вдоль заданной траектории.

В данном исследовании ставятся задачи обзора имеющихся работ по компенсации внешних возмущающих воздействий, выбора наиболее подходящего и его доработки для применения в робототехнической системе. Такой системой здесь является комплекс, включающий в себя модель надводного судна, которая может двигаться согласно указанному закону управления, а также бассейн. Данный комплекс предназначен для апробации систем управления перед их установкой на реальные полноразмерные надводные судна с целью их последующего движения в полностью автоматическом режиме. Робототехнические системы подобного рода, как правило, подвержены внешним возмущающим воздействиям, которые необходимо устранять в активном режиме, так как пассивные средства (установка килля или подводных крыльев) не позволяют добиться желаемого эффекта в полной мере. Использование модели надводного судна в составе комплекса позволяет сэкономить средства на этапе отладки закона управления, а также не подвергает риску жизни людей и дорогостоящее оборудование.

Ставится задача разработки закона управления с учетом возможных возмущающих воздействий, действующих на корабль. Модель объекта управления следует выбирать с учетом наличия нежелательных воздействий, действующих на систему, а именно:

$$y(t) = \bar{u}(t) + \bar{f}(t) + \sum_{i=1}^k \bar{\delta}_i(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $\bar{u}(t) = \frac{b(p)}{a(p)}u(t-h)$ – результат действия сигнала управления на объект управления, $u(t)$ – сигнал управления, h – известное запаздывание; $\bar{f}(t) = \frac{g(p)}{a(p)}f(y(t))$ – результат действия нелинейной составляющей на объект управления, $y(t)$ – выход системы; $\bar{\delta}_i(t) = \frac{e(p)}{a(p)}\sigma_i \sin(\omega_i t + \phi_i)$ – результат действия на объект управления i -го гармонического возмущения с неизвестной амплитудой σ , частотой ω и фазовым сдвигом ϕ ; $\varepsilon(t)$ – экспоненциальная затухающая составляющая, обусловленная ненулевыми начальными значениями.

Задача заключается в построении такого алгоритма $u(t)$, который обеспечивает управление по выходу:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0. \quad (2)$$

Для достижения цели необходимо в первую очередь решить задачу идентификации параметров гармоник возмущений. Для этого рассмотрим два метода оценки параметров. Первый метод – градиентный алгоритм идентификации возмущений – основан на введении вспомогательного линейного фильтра и составления регрессора. Он основан на принципах, представленных в работе [2], и имеет следующий вид:

$$\hat{\omega}_i(t) = \sqrt{|\hat{\theta}_i|}; \xi(s) = \frac{\lambda^{2k}}{(s+\lambda)^{2k}} y(s), \quad (3)$$

$$\hat{\Theta}(t) = K\Omega(t) \left(\xi^{(2k)} - \Omega^T(t)\hat{\Theta}(t) \right), \quad (4)$$

где $K = \text{diag}\{\kappa_i > 0, i = 1, 2, \dots, k\}$, $\xi(s)$ – вспомогательный линейный фильтр, λ – коэффициент настройки, $\hat{\Theta}^T = [\hat{\theta}_1 \dots \hat{\theta}_{k-1} \hat{\theta}_k]$ – вектор оценок, $\Omega^T(t) = [\xi^{(2k-1)}(t) \dots \xi^{(3)}(t) \xi^{(1)}(t)]$ – регрессор. Алгоритм такого вида обеспечивает цель:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\omega_i - \hat{\omega}_i(t)| = 0. \quad (5)$$

Вторым способом оценки параметров гармонических возмущающих воздействий является метод каскадной редукции. Для частного случая с двумя гармониками он будет иметь вид:

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = -\gamma_2 \zeta_2^2 \hat{\theta}_2 + \gamma_2 \zeta_2 \bar{z}, \quad (6)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = -\gamma_1 \zeta_1^2 \hat{\theta}_1 + \gamma_1 \zeta_1 z', \quad (7)$$

где $z' = z \hat{\theta}_2 \zeta_2$; $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$ – параметры, отвечающие за скорость сходимости. Для метода каскадной редукции оценка $\xi_i(t)$ вычисляется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \hat{\xi}_1(t) \\ \hat{\xi}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{\xi}_k(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \hat{\theta}_1 & \hat{\theta}_2 & \dots & \hat{\theta}_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^{k-1} & \hat{\theta}_2^{k-1} & \dots & \hat{\theta}_k^{k-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \xi^{(2)}(t) \\ \vdots \\ \xi^{(2k-2)}(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\hat{\xi}_i$ – оценка i -ой гармоники $\xi_i, i = 1, \dots, k$.

Из (6) и (7) видно, что в методе каскадной редукции параметр следующей гармоники вычисляется из значения параметра предыдущей, что должно положительно сказаться на

скорости сходимости оценок. Необходимо провести исследовательские испытания для определения метода с меньшим значением времени переходного процесса.

Для компенсации возмущающих воздействий будем подавать управление в противофазе с действующим возмущением на основании оценок, полученных одним из двух методов (3–4) и (6–8). С учетом наличия запаздывания используется схема предиктора. Сформированный закон управления имеет вид:

$$u(t) = -\sum_{i=1}^k \hat{k}_{pi} \hat{\xi}_i(t) + \hat{k}_{di} \hat{\xi}(t). \quad (9)$$

Модель оценки сигнала $\hat{\xi}_i(t)$ имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \hat{\xi}_1(t) \\ \hat{\xi}_2(t) \\ \vdots \\ \hat{\xi}_k(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \hat{\theta}_1 & \hat{\theta}_2 & \dots & \hat{\theta}_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\theta}_1^{k-1} & \hat{\theta}_2^{k-1} & \dots & \hat{\theta}_k^{k-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi^{(1)}(t) \\ \xi^{(3)}(t) \\ \vdots \\ \xi^{(2k-1)}(t) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Проверка систем автоматического управления надводными судами на реальных объектах зачастую затруднена. Это занимает значительное количество времени, кроме того, подвергается риску дорогостоящее оборудование и жизни людей. Поэтому первичную проверку разработок удобно выполнять на специализированных обучающих комплексах. Робототехническая установка, на которой производилась апробация методов, описанных в данной работе, включает в себя бассейн с водой, модель надводного судна, персональный компьютер с подключенной видеокамерой.



Рис. 1. Электронные компоненты модели судна

За основу для модели корабля было выбрано российское рыболовецкое судно «Траулер Росвик». Руление судном производится двумя подруливающими устройствами и рулевым соплом вместо простого руля. Модель выполнена в масштабе 1:32. Размеры позволяют разместить в корпусе один главный двигатель, два подруливающих устройства, сервопривод для управления рулевым соплом, батарейный блок, все необходимые электронные платы (рис. 1).

Как правило, координаты реального надводного судна в открытом водном пространстве определяются с помощью GPS. Однако использование данной системы в составе робототехнического комплекса невозможно, так как погрешность определения координат больше, чем размеры модели корабля. В силу данных ограничений было решено для определения координат корабля в границах бассейна использовать видеокамеру с системой технического зрения. Видеосигнал передается в персональный компьютер, где происходит его обработка, обрабатывается система управления, затем задания на двигатели передаются на модель надводного судна посредством Bluetooth.

Принцип определения координат модели надводного судна основан на выделении из видеопотока, поступающего с камеры, точек, соответствующих цвету корабля. Схема обработки видеосигнала представлена на рис. 3. Первым шагом необходимо провести бинаризацию изображения – уменьшение количества информации, полученной от камеры. В результате получаем матрицу, по размерам совпадающую с исходным изображением,

элементами которой являются только «0» или «1», причем «1» должна соответствовать контуру корабля.

В этой бинарной матрице получили область, соответствующую положению корабля. Первым шагом идет определение двух горизонтальных (верхняя и нижняя), а также двух вертикальных (левая и правая) границ области. Пересечение диагоналей этих границ является координатой середины модели надводного судна. Затем через это пересечение строится линия, пересекающая максимально возможное для данной области число пикселей, равных «1». Угол отклонения этой линии от горизонтальной оси является углом ориентации судна, но его можно измерить только в пределах $[-\pi/2; \pi/2)$. Для определения угла в полном диапазоне необходимо ввести второй объект, координаты которого будут определяться системой технического зрения. Таким объектом является красная метка, закрепленная на носу корабля. Для нее также необходимо отдельно провести бинаризацию. Для полученной маски носа надводного судна координаты определяются так же, как и для корпуса. Далее они используются для определения ориентации корабля в полном диапазоне.

На рис. 2 показаны результаты работы программы управления и основные этапы обработки видеосигнала: *a* – определение маски корпуса, *б* – определение маски носа, *в* – определение трех координат судна. Полученные координаты используются для функционирования закона управления, описанного ранее.

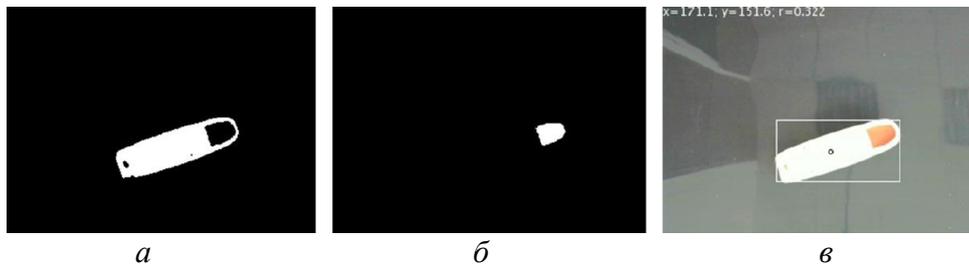


Рис. 2. Окна наблюдения за экспериментом работающей программы

Апробация алгоритма управления производилась на базе робототехнического комплекса, описанного выше. Волны создавались вручную через равные промежутки времени. Первоначально модель надводного судна запускалась с первым алгоритмом активной компенсации возмущающих воздействий, затем со вторым. Полученные данные сохранялись на персональном компьютере для последующей обработки. Для корабля была установлена желаемая зона, где он должен был стабилизироваться. Каждый эксперимент выполнялся в течение двух минут. Успешным выполнением алгоритма считается удержание модели надводного судна в течение всего времени испытания.

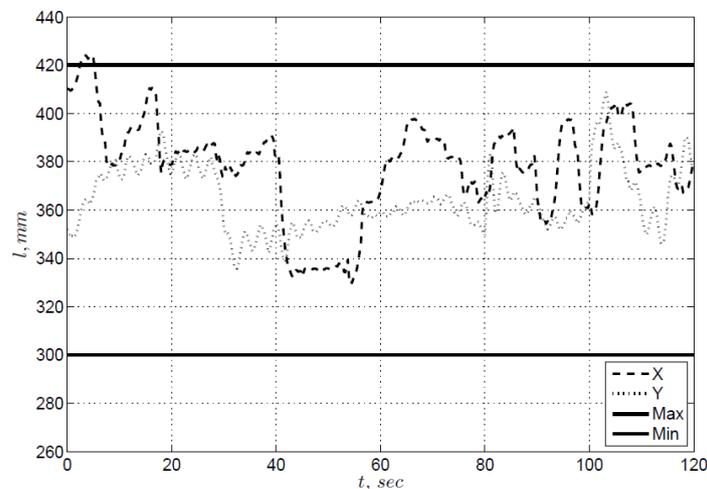


Рис. 3. Значения координат при эксперименте с алгоритмом на основе метода каскадной редукции

На рис. 3 показаны графики координат X и Y в зависимости от времени при проведении эксперимента позиционирования модели надводного судна в желаемой точке при наличии внешних возмущающих воздействий с применением второго алгоритма компенсации. Частота возмущения составляла 1 Гц, информация о частоте возмущения в регулятор корабля не передавалась. «Max» обозначает максимальное значение координаты желаемой зоны, равное 420 мм. «Min» – минимальное значение желаемой зоны, равное 300 мм. Как видно из результатов эксперимента, модель почти все время эксперимента удерживает необходимое положение при наличии таких возмущений. В течение первых пяти секунд по координате X произошел выход за пределы желаемой зоны, что определяется невысокой скоростью сходимости оценки частоты возмущающего воздействия. При настройке коэффициентов наблюдателя частоты необходимо выдержать баланс между быстродействием и устойчивостью к шумам. В дальнейшем корабль остается в требуемой зоне.

В ходе эксперимента выяснилось, что первый алгоритм не обладает достаточным быстродействием для обеспечения корректного функционирования системы на реальном объекте. С данной задачей справляется второй алгоритм компенсации возмущающих воздействий.

Заключение

В ходе данной работы были выполнены следующие этапы: выбрана и обоснована математическая модель объекта управления; разработана система управления кораблем, включающая в себя алгоритм идентификации параметров корабля.

Предложены два метода идентификации возмущений: градиентный алгоритм и алгоритм метода каскадной редукции; проведены исследовательские испытания, в ходе которых был собран робототехнический комплекс для апробации алгоритмов управления кораблями, подготовлено необходимое программное обеспечение, разработано устройство определения локальных координат модели корабля.

Итогом проведения исследовательских испытаний является подтверждение работоспособности разработанного алгоритма управления на модели корабля.

Публикации

1. *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 // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). 2013. Vol. 7. No 1. P. 1867–1872.
2. *Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Surov M.O., Shavetov S.V., Borisov O.I., Gromov V.S.* Simple output stabilization approach for robotic systems // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). Vol. 7. No 1. P. 1873–1878.
3. *Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Vedyakov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S., Margun A.A., Bazylev D.N.* Fast compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay // 11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing. 2013. Vol. 11. P. 546–551.

Литература

1. *Бобцов А.А.* Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу. СПб., 2011. – 173 с.
2. *Fradkov A.L., Miroshnik I.V., Nikiforov V.O.* Nonlinear and adaptive control of complex systems. 1999. – 528 p.



Зименко Константин Александрович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: kostyazimenko@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

К.А. Зименко

Научный руководитель – доцент А.С. Кремлев

Цель работы – исследование способов использования сигналов электромиографии в системах управления различными мехатронными и робототехническими комплексами. Задачей исследования являлись обработка сигналов электромиографии и идентификация типов выполненных оператором движений с высокой точностью и без существенных временных потерь на обработку сигнала для последующего использования в системах управления робототехническими устройствами.

Использование сигналов поверхностной электромиографии (ПЭМГ) в системах управления робототехническими комплексами и создание алгоритмов их обработки является весьма актуальной и перспективной задачей в связи с интенсивным развитием биоинженерии, робототехники и кибернетической физики.

Информация, содержащаяся в сигнале электромиограммы (ЭМГ), может использоваться при создании и использовании активных протезов, экзоскелетов и других мехатронных и робототехнических устройств, управление которыми происходит посредством изменения биопотенциалов мышц (рис. 1). Такое управление называется миоэлектрическим. Анализ ЭМГ сигналов позволяет определить планируемое движение человека для приведения в действие исполнительного механизма (например, электродвигателя активного протеза или экзоскелета).

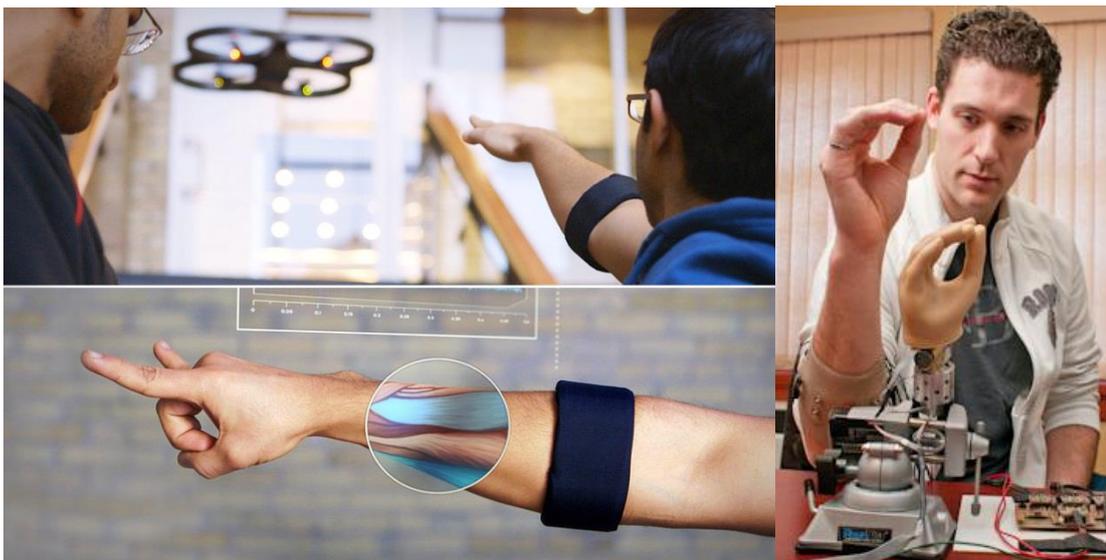


Рис. 1. Примеры использования сигнала электромиографии для управления робототехническими системами

Однако для подобного успешного применения сигналов ПЭМГ в системах управления робототехническими комплексами требуется решение ряда задач:

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

- выявление особенностей и последующей обработки сигналов ЭМГ;
- распознавание движений и их классификация;
- создание закона управления самой робототехнической системой и т. д.

В силу своей комплексности и универсальности задача применения сигнала ЭМГ для управления робототехническими комплексами при всем многообразии подходов не имеет конкретного решения, что еще раз подтверждает актуальность выбранной тематики.

В рамках работы наряду с теоретическими обоснованиями были рассмотрены практические аспекты внедрения и применения анализа сигнала ЭМГ, а также проведен ряд экспериментов. Из всего разнообразия способов анализа сигналов в ходе работы был выбран метод наиболее подходящий для системы управления робототехническим устройством по состоянию биопотенциалов на мышцах человека. При этом выбор способа анализа сигнала ЭМГ осуществлялся с учетом времени, необходимого для его обработки, чтобы систему можно было использовать в условиях приближенных к реальным.

В данной работе был рассмотрен метод идентификации частот мультигармонического сигнала посредством последовательной редукции, а также метод робастной идентификации основной частоты сигнала. Ставилась задача адаптировать их для использования в анализе сигналов ЭМГ. Подобные методы позволяют идентифицировать частоты мультигармонического сигнала ЭМГ в режиме реального времени. Данные, полученные с их помощью, можно использовать, в том числе и в диагностических целях. Например, они позволяют определять планируемое движение человека для приведения в действие исполнительного механизма: электродвигателя активного протеза, или экзоскелета, или какого-либо другого устройства реабилитации.

Для регистрации сигналов ЭМГ использовался прибор регистрирования биопотенциалов *kardi3/9* (рис. 2).

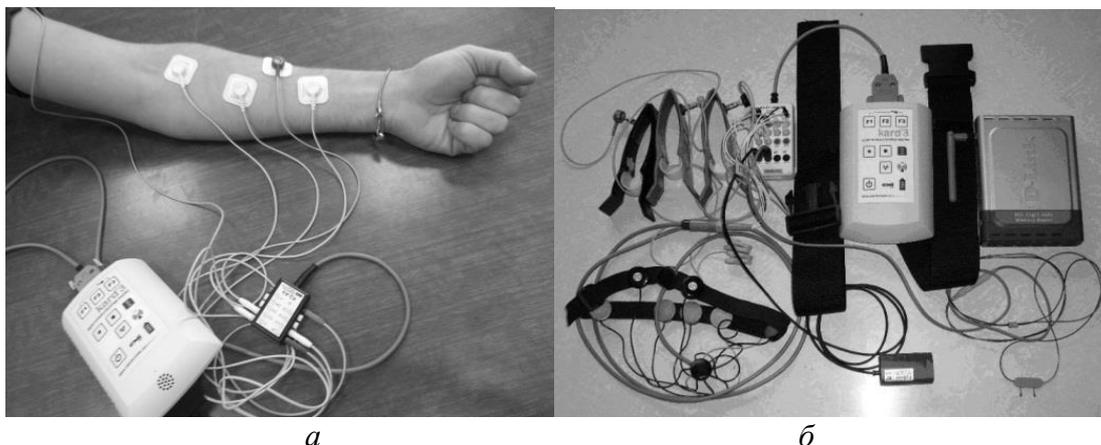


Рис. 2. Экспериментальные исследования: а – референтная схема измерения биопотенциалов; б – внешний вид регистратора биопотенциалов *Kardi3/9*

На первом этапе работы, применив нейросетевой классификатор и предварительную обработку сигнала ЭМГ вейвлет-анализом, была получена система классификации движений, выполняемых оператором. При проведении серии экспериментов, где по сигналу ЭМГ от четырех электродов определялся один тип движения из трех (сгибание кисти, вращательные ее движения вправо и влево), данная система показала точность определения 94 %. Однако такая система включает в себя оконные техники, что негативно влияет на управление робототехническими системами, вызывая появление задержек в канале управления.

Для устранения выявленных недостатков и классификации движений в режиме реального времени была проведена серия экспериментов. На мышцы предплечья человека устанавливался электрод. Второй электрод крепился на плечо и выступал в качестве референта. Данные с электродов снимались при помощи девятиканального усилителя

Kardi3/9, предназначенного для длительной регистрации электрофизиологических сигналов высокого разрешения в полосе частот от 0 до 350 Гц. Полученные данные передавались для обработки на ПК. Эксперименты проводились на пяти здоровых мужчинах в возрасте от 20 до 25 лет. Испытуемые выполняли три типа движений: сгибание кисти и вращение ею по и против часовой стрелки.

Основываясь на спектральных характеристиках (рис. 3–5), можно сделать вывод: основная часть энергии сигнала содержится в двух или трех гармониках, причем первая гармоника одинакова для всех типов движений, две оставшиеся имеют различные частоты, зависящие от типа движения. Остальные гармоники несут в себе малую часть энергии и являются высокочастотными шумами. Для подавления шумов и исключения одинаковой/основной гармоники можно использовать полосовой фильтр частот с полосой пропускания от 12 до 20 Гц. Таким образом, в дальнейшей обработке сигнала участвуют только гармоники, содержащие информацию о типе движения: 15,6 Гц – для сгибания кисти, 17,57 Гц – для вращения по часовой стрелке, 13,7 Гц для вращения против часовой стрелки.

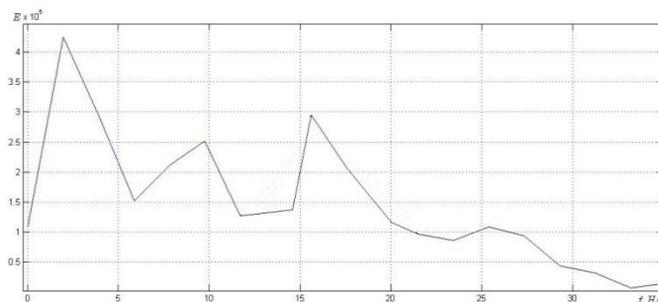


Рис. 3. Спектральная плотность сигнала ЭМГ при сгибании кисти

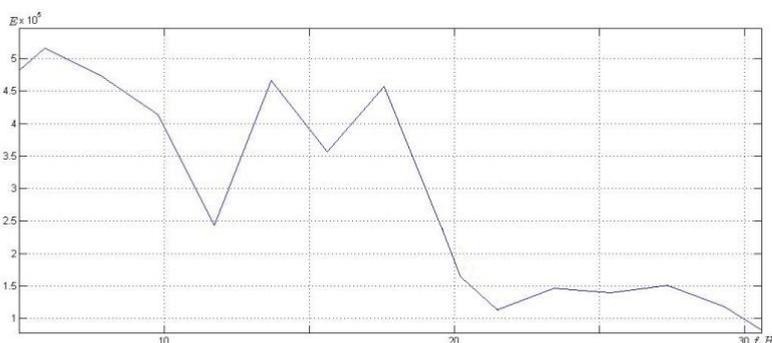


Рис. 4. Спектральная плотность сигнала ЭМГ при вращении кисти по часовой стрелке

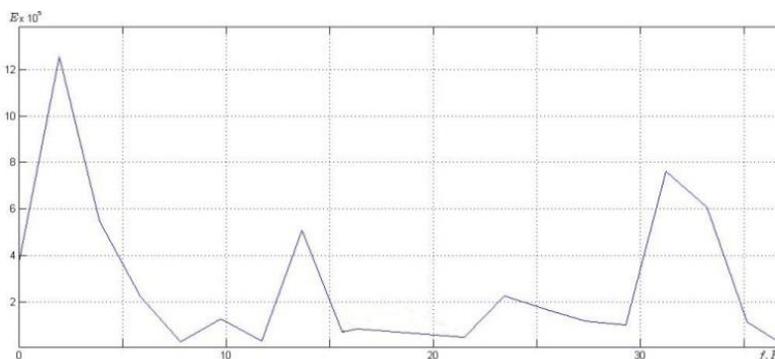


Рис. 5. Спектральная плотность сигнала ЭМГ при вращении кисти против часовой стрелки

На основе этого был предложен следующий алгоритм классификации:

- применение полосового фильтра, оставляющего для дальнейшей обработки необходимый частотный диапазон;
- идентификация частот сигнала;

– определение посредством классификатора типа выполняемого движения.

Следовательно, проблема классификации типов движений и последующего управления робототехническими системами сводится к идентификации частот сигнала ЭМГ в режиме реального времени.

Основываясь на данном алгоритме для управления робототехническими системами были использованы алгоритмы, описанные в [1–3]. Полученные результаты представлены в [6].

Стоит отметить, что в некоторых задачах для определения типа выполненного оператором движения и последующего управления робототехническим устройством достаточно определить только одну, энергетически наиболее затратную на исследуемом диапазоне, частоту.

В таких случаях возможно использование менее затратного по вычислениям алгоритма робастной идентификации частоты гармонического сигнала по отношению к шумам и сигналам с меньшей амплитудой [1].

Заключение

Получаемые с помощью представленных методов данные могут быть использованы для определения в режиме реального времени типа выполненного оператором движения. В данном случае, когда необходимо определить одно из трех типов движений достаточно в качестве классификатора использовать наиболее простой и менее затратный, например классификатор минимальных расстояний (точность составила 98 %).

В случае распознавания большего количества команд возникает необходимость идентификации частот большего количества гармоник и/или использование частот, полученных после идентификации в качестве дополнительной информации к классификаторам.

Таким образом решена проблема классификации движений, выполненных оператором, что позволяет использовать сигнал ЭМГ для управления робототехническими и мехатронными системами. Пример такого использования приведен в статьях [4], [5]. Например, в [4] исследуемый сигнал ЭМГ использовался для управления двухзвенным манипулятором и для управления мобильным роботом Вое-Bot.

Публикации

1. *Zimenko K.A., Margun A.A., Bobtsov A.A., Bazylev D.N., Kremlev A.S.* Real-time EMG signal frequency identification // Proceedings of the 19th IFAC World Congress. 2014. Vol. 19. P. 2951–2956.
2. *Zimenko K.A., Margun A.A., Kremlev A.S.* EMG real-time classification for robotics and HMI // 2013 18th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2013. P. 340–343.
3. *Zimenko K.A., Borgul A.S., Margun A.A., Kremlev A.S., Krasnov A.Y.* Intuitive control for robotic rehabilitation devices by human-machine interface with EMG and EEG signals // 2012 17th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2012. P. 308–311.
4. *Боргуль А.С., Зименко К.А., Маргун А.А., Кремлев А.С.* Многофункциональный активный протез руки // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 86–89.
5. *Зименко К.А., Боргуль А.С., Маргун А.А.* Анализ и обработка сигналов электромиограммы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 1 (83). С. 41–43.
6. *Зименко К.А.* Методы обработки сигналов электромиографии в системах управления реабилитационных устройств // Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга. СПб., 2014. С. 46–55.

Литература

1. Aranovskiy S.V., Bobtsov A.A., Kremlev A.S., Nikolaev N.A., Slita O.V. Identification of frequency of biased harmonic signal // *European Journal of Control*. 2010. Vol. 16. No 2. P. 129–139.
2. Bobtsov A.A. New approach to the problem of globally convergent frequency estimator // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2008. Vol. 22. No 3. P. 306–317.
3. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Kolyubin S.A., Vedyakov A.A., Borisov O.I., Gromov V.S., Margun A.A., Bazylev D.N. Fast compensation of unknown multiharmonic disturbance for nonlinear plant with input delay // *11th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*. 2013. Vol. 11. P. 546–551.
4. 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 // *2012 17th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*. 2012. P. 308–311.
5. Боргуль А.С., Зименко К.А., Маргун А.А., Кремлев А.С. Многофункциональный активный протез руки // *Известия вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 4. С. 86–89.
6. Зименко К.А. Методы обработки сигналов электромиографии в системах управления реабилитационных устройств // *Сборник работ студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга*. СПб., 2014. С. 46–55.



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

СОЗДАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

Д.А. Клюкин

Научный руководитель – профессор А.И. Сидоров

Целью проекта является разработка метода записи информации с высокой плотностью в оптическом материале на основе фото-термо-рефрактивных (ФТР) стекол.

В данном исследовании предлагается рассмотреть композитные материалы для записи информации на основе ФТР-стекол. Перед записью предварительно формируются нейтральные атомы и молекулярные кластеры серебра, которые вносят вклад в люминесценцию стекла при ее возбуждении ультрафиолетовым излучением (УФ-излучением). Предварительная термообработка (ТО) этих стекол проходила ниже температуры стеклования T_g . Существует другой способ воздействия на данный тип стекол, при котором предварительная ТО проводится при температурах выше T_g , что приводит к росту наночастиц с галогенидной оболочкой. Как известно, наночастицы серебра обладают плазмонным резонансом, который выражается в интенсивной полосе поглощения [1]. Ее максимум обычно находится в интервале 400–500 нм. Такие образцы могут также служить заготовкой для записи информации. В целом удобство использования стекол в качестве носителя информации заключается в том, что ему можно придать практически любые размеры и форму, что будет использовано в дальнейшем при описании метода записи информации.

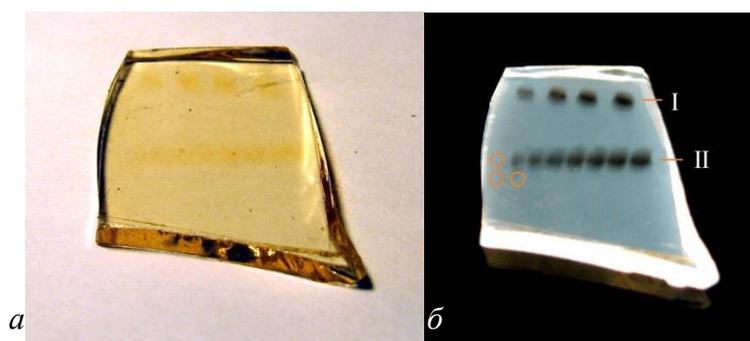


Рис. 1. Фотографии образца: а – после облучения УФ наносекундными лазерными импульсами; б – его люминесценция при возбуждении излучением с $\lambda = 365$ нм. I – строка пятен с одним, пятью, десятью и двадцатью импульсами облучения (слева направо) с энергией $2,7 \text{ Дж/см}^2$; II – строка пятен с пятью импульсами облучения на пятно с плотностью энергии $0,05\text{--}2,7 \text{ Дж/см}^2$ (увеличение энергии облучения направлено слева направо). Пустые кружки показывают регионы, где плотность энергии была недостаточной для тушения люминесценции [3]

В основе разрабатываемой методики для записи информации лежит явление тушения люминесценции. Как было сказано ранее, после ТО ниже T_g люминесцентные центры, которыми здесь служит серебро, представлены в виде нейтральных атомов и молекулярных кластеров. Они излучают свет в широком диапазоне от 400 до 800 нм при возбуждении излучением 300–400 нм [2]. Квантовый выход люминесценции после облучения был измерен при комнатной температуре прибором C9920-02G (Hamamatsu Photonics) и составил 18,8 % и 16 % при возбуждении на длинах волн 365 и 400 нм соответственно.

В ходе экспериментов было установлено, что при облучении данных стекол лазерным излучением наносекундной длительности на длине волны $\lambda=355$ нм происходит тушение люминесценции [3]. На рис. 1 показан образец после облучения стекол этим излучением.

На рис. 1а видно, что оптическая плотность в местах облучения увеличилась. Это связано как с изменением состояния молекулярных кластеров серебра, так и с появлением новых дефектов матрицы стекла в облученной области [4]. На рис. 1б показано влияние дозы облучения и плотности энергии в импульсе на тушение люминесценции в облученной области. При их увеличении тушение люминесценции усиливается. Также можно видеть, что существует пороговое значение плотности энергии в импульсе, при котором тушение люминесценции не происходит. Этот эффект может быть весьма полезен при оптической записи информации.

На рис. 2 представлены спектры люминесценции участков стекла с различной дозой облучения. При разложении их на гауссианы можно выделить две основных полосы: первая находится на 559 нм, а вторая – на 637 нм. При увеличении дозы облучения уменьшается амплитуда обеих полос, что выражается в сохранении формы спектров. Максимум спектров поглощения лишь незначительно смещается в длинноволновую область на величину около 5 нм. Следует отметить, что оставшаяся люминесценция в облученных областях может соответствовать излучению, пришедшему из близлежащих не подвергавшихся облучению участков стекла. Учитывая это, можно сказать, что люминесценция при данном возбуждении практически не наблюдается. Зная, что используемый лазер работает с частотой генерации 10 Гц, изменить спектр люминесценции можно за десятые доли секунды.

На рис. 3а показан образец, который был термообработан в течение 1 ч при температуре 400°C после того, как был предварительно облучен лазерными импульсами на длине волны $\lambda = 355$ нм. В результате изменилась интенсивность люминесценции как самого стекла, так и предварительно облученных третьей гармоникой участков. Это говорит о том, что изменилась концентрация молекулярных кластеров серебра, которые ранее не люминесцировали в видимой области. Можно заметить, что из-за неравномерности

интенсивности излучения в поперечном сечении пучка, интенсивность в облученной области восстановилась неравномерно. При повторном облучении образцов УФ-лампой (рис. 3б) люминесценция восстанавливается равномерно по всей облученной области.

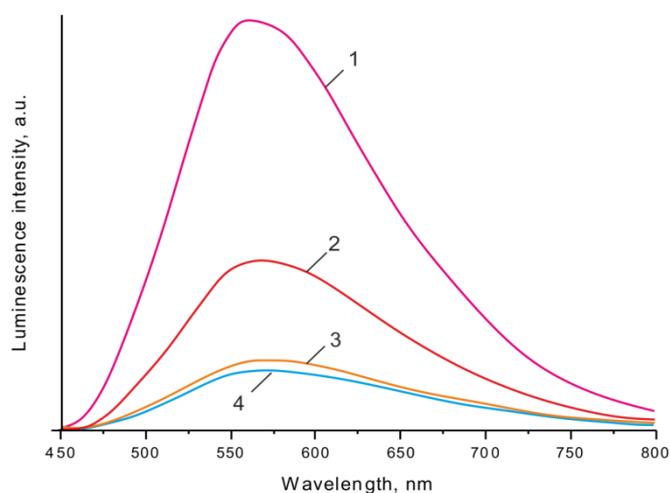


Рис. 2. Спектры люминесценции областей, облученных третьей гармоникой наносекундного лазера: 1 – до облучения; 2 – число лазерных импульсов – 1; 3 – число лазерных импульсов – 5; 4 – число лазерных импульсов – 10. Плотность энергии в импульсе $2,7 \text{ Дж/см}^2$. Длина волны возбуждения $400\text{--}440 \text{ нм}$ [3]

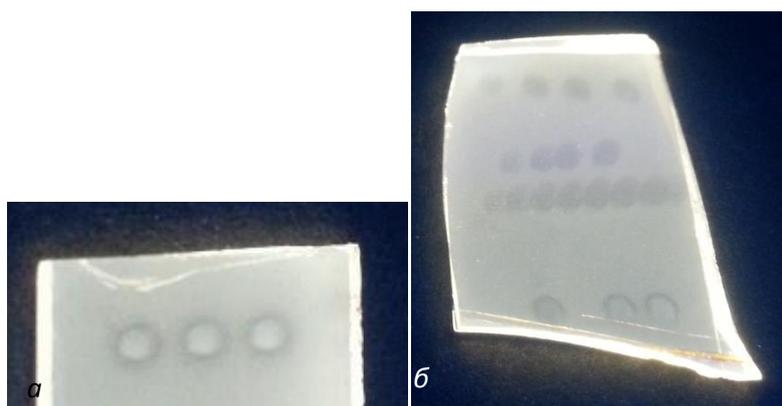


Рис. 3. Люминесценция образца: а – после повторной ТО; б – после повторного УФ-облучения. Длина волны возбуждения 365 нм

На рис. 4 приведена схема, согласно которой происходят изменения молекулярных кластеров серебра в стекле при описанных ранее воздействиях.

Вначале серебро в стекле представлено в виде ионов. После УФ-облучения формируются атомы серебра благодаря фотоиндуцированным свободным электронам от ионов церия. Часть электронов восстанавливает ионы сурьмы. При ТО атомы серебра диффундируют вместе с ионами серебра и формируют нейтральные и заряженные молекулярные кластеры серебра. Нейтральные молекулярные кластеры серебра, такие как Ag_2 , Ag_3 , Ag_4 и т. д., обладают люминесценцией в видимом диапазоне [2]. При облучении наносекундными импульсами на длине волны $\lambda=355 \text{ нм}$ происходит фотоионизация нейтральных молекулярных кластеров серебра. Это приводит к тушению люминесценции. При последующей ТО электроны, которые были запасены в ионах сурьмы снова восстанавливают ионы и заряженные молекулярные кластеры серебра.

Данный цикл можно повторять до того момента, когда при ТО перестанут высвобождаться электроны. Максимальное количество итераций, при которых будет выполняться описанный механизм, заслуживает отдельного исследования и этой работе не

рассматривается. Также была осуществлена попытка произвести ТО образца с помощью CO_2 лазера. Поскольку длина волны этого типа лазеров лежит в дальнем ИК-диапазоне, то вся энергия излучения переходит в тепло. Этот факт можно использовать для локального нагрева участков стекла [5]. Однако правильного режима термообработки, при котором достигался нужный диапазон температур, подобрать не удалось. Эта проблема будет исследоваться в будущем более тщательно.

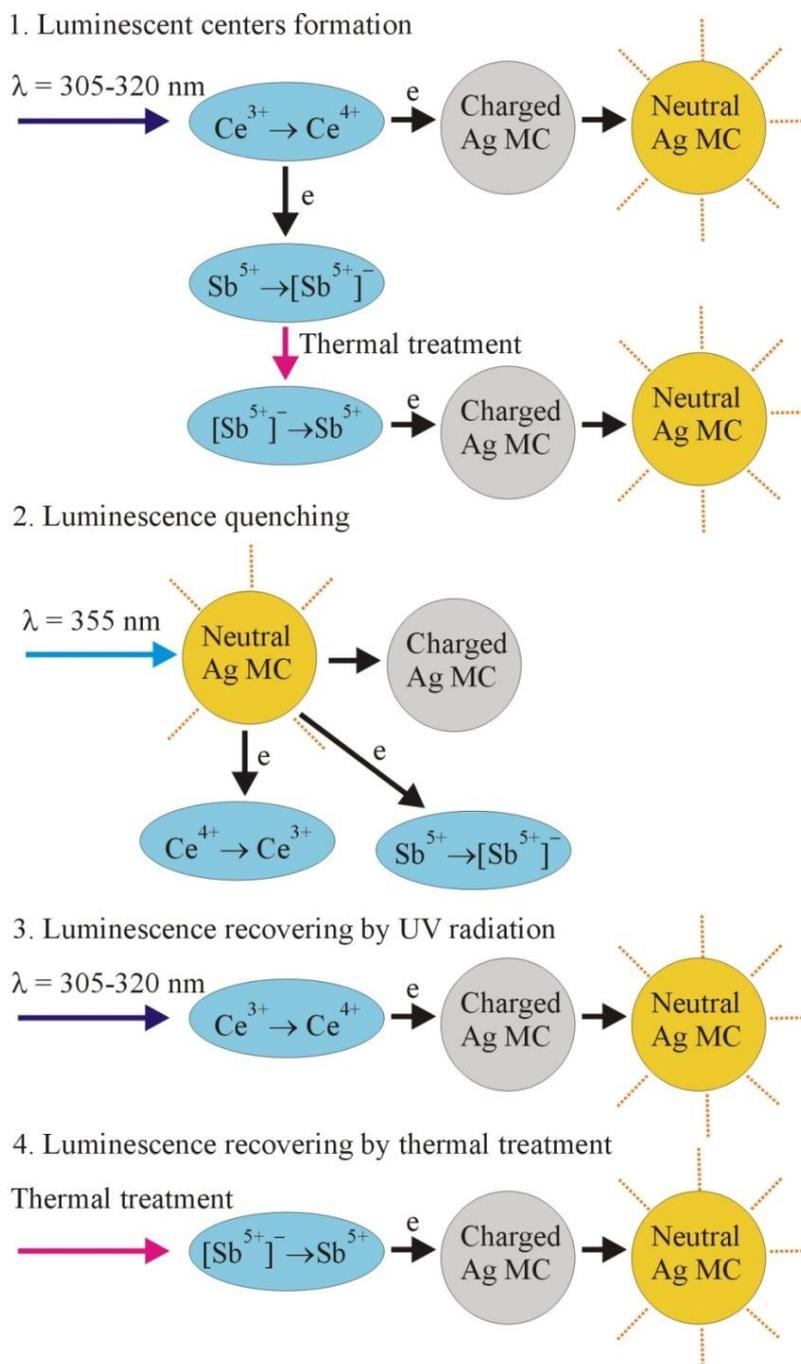


Рис. 4. Схема формирования, тушения и восстановления люминесценции в ФТР-стеклах [3]

Чтобы создать устройство оптической памяти, в котором бы в качестве среды для записи информации использовалось ФТР-стекло и применялся описанный выше эффект тушения и восстановления люминесценции, требуется разработать структуру, на подобие оптических дисков CD, DVD или Blu-ray.

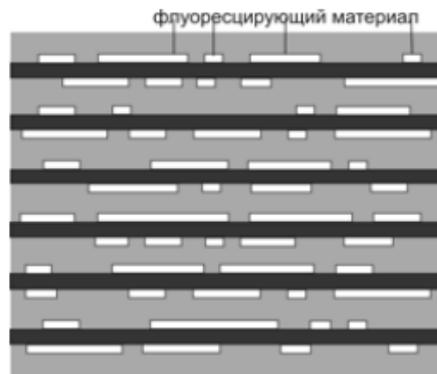


Рис. 5. Структура многослойного флуоресцентного диска [6]

Для записи информации требуется использовать:

- оптический многослойный диск со слоями из ФТР-стекла, в котором сформированы нейтральные молекулярные кластеры серебра;
- источник лазерного излучения на длине волны $\lambda = 355$ нм, способный создавать плотность энергии в импульсе $1,0\text{--}2,8$ Дж/см²;
- объектив с большой числовой апертурой $NA = 0,7\text{--}0,8$.

Лазерное излучение, проходя через эту линзу, будет фокусироваться с нужной плотностью энергии в одном из слоев оптического диска. Тушения люминесценции в других слоях, лежащих на пути к области записи, происходить не будет, так как не будет достигнута пороговая плотность энергии, как это было показано на рис. 1б.

Для считывания информации можно использовать лазерные источники на длине волны $\lambda = 405$ нм, применяемые в *Blu-ray*-приводах. Данная длина волны излучения подходит для этой цели, потому что ею возбуждается интенсивная люминесценция в видимом диапазоне, как это было показано на рис. 2. Возбуждению люминесценции в области считывания информации будет соответствовать логическая единица, а логическому нулю – ее отсутствие. Для измерения уровня сигнала можно использовать фотодиод. В зависимости от его чувствительности можно уменьшать энергию в импульсе лазерного источника для записи информации. Чем она будет меньше, тем труднее будет определить разницу между логическим нулем и единицей.

Информационная емкость флуоресцентных носителей информации составляет 50 Гб [6]. Высокая плотность записи информации достигается благодаря использованию УФ-излучения и высокоапертурного объектива, согласно следующей формуле дифракционного предела:

$$d_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{2NA}.$$

Таким образом, плотность записи может достигать 10^9 бит/см² [6].

Заключение

В данной работе был предложен метод записи информации в композитной среде на основе ФТР-стекла. Он сводится к нескольким шагам. Сначала производится предварительное формирование молекулярных кластеров серебра в ФТР-стеклах при помощи облучения УФ-лампой и ТО при температурах ниже T_g . После этого стекло приобретает способность люминесцировать в видимой области, интенсивность которой удастся контролировать при помощи облучения его наносекундным лазером на длине волны 355 нм с различной дозой и плотностью энергии в импульсе. Показано, что люминесценцию в облученной области можно восстановить при помощи последующей ТО или повторного облучения УФ-лампой. Также были предложены подходящие условия использования найденного эффекта для записи оптической информации с высокой плотностью.

Публикации

Klyukin D.A., Sidorov A.I., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Luminescence quenching and recovering in photo-thermo-refractive silver-ion doped glasses // *Optical Materials*. 2014. Vol. 38. P. 233–237.

Литература

1. Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii D.A. Silver nanoparticles in oxide glasses: Technologies and properties // *Silver nanoparticles*. Vukovar, 2010. P. 177–200.
2. Dubrovin V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. Luminescence of silver molecular clusters in photo-thermo-refractive glasses // *Optical Materials*. 2014. Vol. 36. No 4. P. 753–759.
3. Klyukin D.A., Sidorov A.I., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Luminescence quenching and recovering in photo-thermo-refractive silver-ion doped glasses // *Optical Materials*. 2014. Vol. 38. P. 233–237.
4. Tomozawa M., Doremus R.H. Treatise on materials science and technology. Vol. 17. Glass II. New York, 1979. – 257 p.
5. Goyes C., Ferrari M., Armellini C. et al. CO₂ laser annealing on erbium-activated glass-ceramic waveguides for photonics // *Optical Materials*. 2009. Vol. 31. No 9. P. 1310–1314.
6. Вениаминов А.В., Михайлов В.Н. Оптические системы записи, хранения и отображения информации. СПб., 2009. – 94 с.



Козлов Алексей Сергеевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем
E-mail: zz.kozlov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕРКОНОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В ДАТЧИКАХ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

А.С. Козлов

Научный руководитель – доцент Д.А. Заколдаев

Цель проекта – исследование и анализ динамики чувствительных элементов герконов в датчиках и преобразователях, а также разработка алгоритма расчета [1–3] характеристик замыкающего симметричного геркона. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выполнены анализ и классификация традиционных и новых типов чувствительных элементов герконов в датчиках и преобразователях [4–6];
- исследованы основные рабочие характеристики плоских упругих чувствительных элементов датчиков;
- решены дифференциальные уравнения динамики чувствительных элементов герконов и определены амплитудные функции [7];
- исследовано влияние присоединенных масс чувствительных элементов герконов на коэффициенты их уравнений динамики [7];
- построена уточненная математическая модель аналитического выражения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ);

- разработан алгоритм вычисления геометрических параметров замыкающего симметричного геркона для написания инженерного программного обеспечения.

Методы исследования

Полученные результаты основаны на системном подходе к рассматриваемой проблеме. Они базируются на традиционных численных методах анализа тонкостенных структур. Для построения математических моделей присоединенных масс применены методы сечений, электромеханических аналогий. При расчете АЧХ чувствительных элементов герконов использован метод половинного деления.

В силу ряда специфических достоинств метод конечных элементов в настоящее время является наиболее популярным для инженерного анализа целого ряда сложных структур. Особую актуальность приобретает проблема системного анализа возможных вариантов повышения его эффективности как при сохранении строгой классической формулировки, так и при использовании его во взаимодействии с другими методами математического анализа подобных структур.

В настоящее время технические требования, предъявляемые к чувствительным элементам герконов, зачастую выходят за рамки возможностей их традиционных форм. Дополнительные возможности в этом отношении создают новые типы мембран с неравномерной формой гофра (с переменной глубиной, шагом и меняющимся вдоль радиуса сечением). Проектирование и исследование новых видов оболочечных чувствительных элементов невозможно без разработки специального математического аппарата, алгоритмов и новых методов расчета. Экспериментальное исследование и контроль такого типа элементов также должен осуществляться новыми методами, например томографическим.

Как статический, так и динамический нелинейные анализы чувствительных элементов остаются наиболее трудоемкими и дорогостоящими этапами расчета [7]. В то же время реальная потребность в разработке таких методов непрерывно растет. Поиск путей их усовершенствования с целью повышения экономичности представляется весьма актуальной задачей.

Своевременными остаются проблемы анализа динамических погрешностей электромеханических чувствительных элементов и комплексной оценки их качества, что требует привлечения метрологических методов расчета при широком спектре воздействующих факторов [7].

При классификации чувствительных элементов необходимо учитывать такие их параметры, как тип, назначение, материал, конструкцию и технологию изготовления. Выбор конкретного чувствительного элемента зависит от множества критериев. Их тип, как правило, зависит от динамики эксплуатации: для жестких динамических условий – чаще всего используются мембранные чувствительные элементы; для промежуточных – сильфоны [8]; для слабо динамичных систем и стационарных установок – пружинные.

Конструкция чувствительных элементов обычно обусловлена их функциональным назначением. По виду их характеристики предполагается разработка специального профиля чувствительного элемента (профилированного – для коробок и мембран; пластинчатого – для пружин) или сочетание нескольких их типов (чувствительные элементы в совокупности с упором). Материал для чувствительных элементов выбирается в зависимости от характера измеряемой среды, ее температуры и типа чувствительного элемента.

- для емкостных и индуктивных датчиков они должны обладать высокими механическими, а также определенными электромагнитными и электрическими свойствами;
- для пьезо- и тензорезистивных датчиков – специфическими электрическими свойствами;
- для электромеханических датчиков – стабильностью, упругостью и прочностью [9, 10].

На выбор материала влияют также другие факторы, например условия эксплуатации: для обычных температур и неагрессивных сред употребляются бронза и сталь; для повышенно-пониженных температур и агрессивных сред – высоколегированные стали и сплавы.

В Табл. 1 приведены классы международной патентной классификации (МПК) мембран с учетом их назначения, конструкции и материала.

Таблица 1
Классы МПК мембранных переключателей

Вид упругого чувствительного элемента	Классы МПК
Мембраны	F16 J3/00 B01 D63/00 C02 F1/44
Мембраны, применяемые для передачи сигнала к индикаторному прибору	G01 D5/00 G08 C19/00 G08C17/02
Мембраны, применяемые в преобразователях	H04 R31/00 H04R 1/00
Мембраны, применяемые в расходомерах	G01 F15/16 G01F 7/00 G01 F1/34 G01 F1/32
Мембранные переключатели (мембранная клавиатура)	H01 H13/52

В Табл. 2 приведены классы МПК пружин (пластин) чувствительных элементов с учетом их назначения, конструкции и материала.

Таблица 2
Классы МПК пружин (пластин) чувствительных элементов

Вид упругого чувствительного элемента	Классы МПК
Пружины	F16 F9/00 F16 F1/00
Пружины тарельчатые	F 16J3/00 F16F3/10
Пружины пластинчатые	B21H3/12 F16 F1/18
Пружины из проволоки	B21F 35/04 B21 F35/00
Пружины, применяемые в устройствах систем регулирования и измерения	G05 G5/05
Пружины в магнитоуправляемых контактах	H01 H1/66 H01 H67/02
Пружины в многоконтактном коммутирующем устройстве	H01 H1/66 H01 H67/02
Пружины, используемые в термометрах	G01 K5/00 G01 K11/00

В Табл. 3 приведены классы МПК для термобиметаллических упругих чувствительных элементов с учетом их назначения, конструкции и материала.

Таблица 3

Классы МПК термобиметаллических упругих чувствительных элементов

Вид упругого чувствительного элемента	Классы МПК
Термобиметаллические упругие чувствительные элементы, используемые для измерения уровня жидкости	G01 F23/20 H01 H37/52
Термобиметаллические упругие чувствительные элементы, используемые в термометрах	G01 K1/24 H05 B1/02
Термобиметаллические упругие чувствительные элементы, используемые в пожарной сигнализации (многофункциональное коммутирующее устройство)	H01 H37/54 H01 H37/40
Термобиметаллические упругие чувствительные элементы, используемые в магнитоуправляемых контактах	H01 H1/66 H01 H37/40
Термобиметаллические упругие чувствительные элементы, изготовление	B23 K 20/00 F03 G7/00
Термобиметаллические упругие чувствительные элементы для термоэлектрических приборов	G01 R5/26 H05 B1/02 H01 H37/54

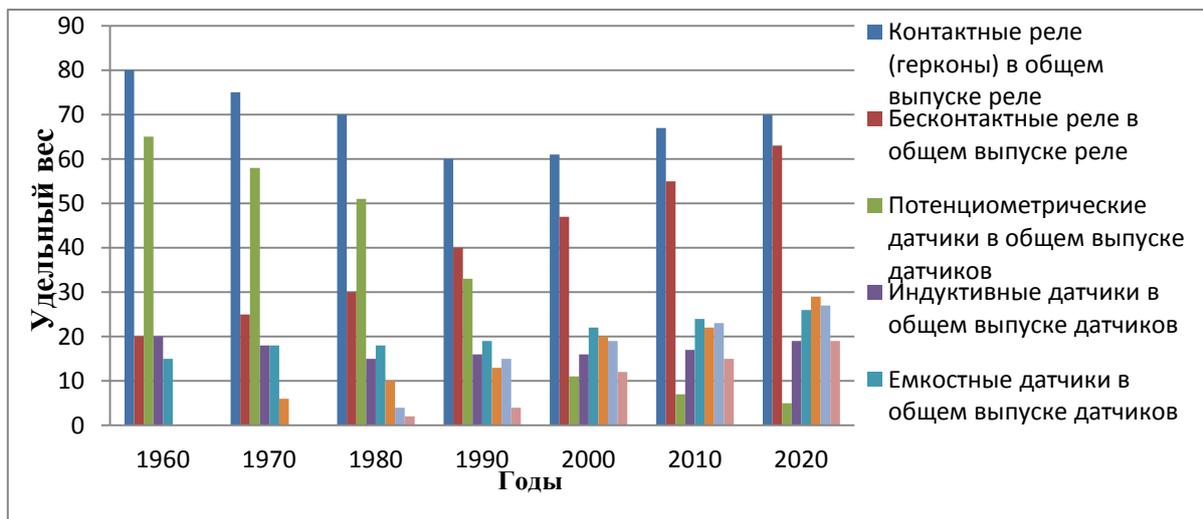


Рис. 1. Перспективы развития датчиков и коммутационных реле

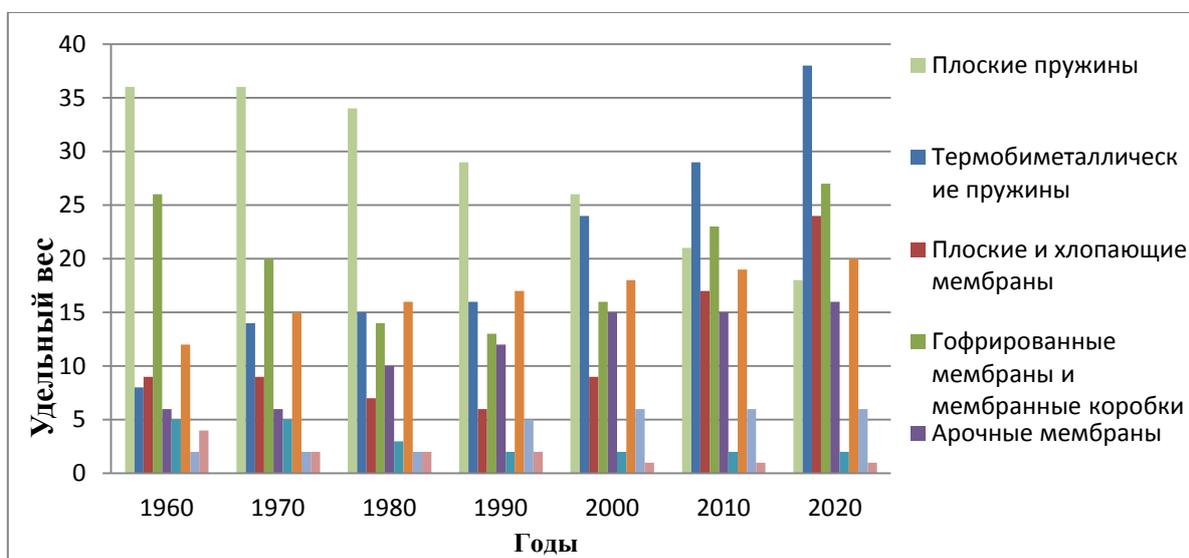


Рис. 2. Перспективы развития чувствительных элементов

Перспективные типы чувствительных элементов датчиков и коммутационных реле представлены на рис. 1 и 2. Наиболее перспективным типом являются герконы. Они имеют массовое применение в системах охраны, датчиках положения и уровня. Можно заметить, что постепенно увеличиваются объемы их промышленного производства.

Области возможного использования результатов проекта

Результаты, полученные в работе, обеспечены строгостью постановок задач и применяемых математических методов, контролем сходимости приближенных решений и аналитических сравнений, где это возможно, с экспериментальными данными и результатами других авторов. В проекте разработаны алгоритмы для построения АЧХ и расчета геометрических параметров чувствительных элементов герконов систем управления, обеспечивающие:

- высокую степень приближения к экспериментальным данным чувствительных элементов герконов в датчиках и преобразователях [4–6];
- уменьшение трудоемкости расчетов на стадии проектирования датчиков и преобразователей.

Предлагаемые к разработке методики расчета статики, динамики и надежности чувствительных элементов систем автоматики позволят обеспечить уменьшение трудоемкости расчетов при соблюдении высокой точности, а также сокращение времени проектирования. Теоретические аспекты данной работы могут найти свою реализацию в учебном процессе высших учебных технических заведений данного профиля.

Публикации:

1. *Козлов А.С., Гатчин Ю.А.* Разработка решений для вывода информационной системы из эксплуатации // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'14. Научное издание в 4-х томах. М., 2014. Т. 3. С. 201–204.
2. *Kozlov A.S., Gatchin Y.A.* Development of solutions for a conclusion of the information system from exploitation // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies IS&IT'14. Scientific publication in 4 volumes. 2014. Vol. 4. P. 78.
3. *Козлов А.С.* Подходы к процессу вывода информационной системы из эксплуатации с обеспечением частичной доступности созданного информационного обеспечения // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 195–196.
4. *Лабковская Р.Я., Козлов А.С., Пирожникова О.И., Гатчин Ю.А.* Тенденции развития герконовой элементной базы // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'14. Научное издание в 4-х томах. М., 2014. Т. 3. С. 301–302.
5. *Pirozhnikova O.I., Gatchin Y.A., Labkovskaya R.Y., Kozlov A.S.* Trends of the development of reed element base // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies IS&IT'14. Scientific publication in 4 volumes. 2014. Vol. 4. P. 81.
6. *Пирожникова О.И., Козлов А.С., Лабковская Р.Я.* Новые разработки в области герконовой элементной базы // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 201–202.
7. *Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Коробейников А.Г.* Моделирование динамики чувствительных элементов герконов систем управления // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Йошкар-Ола, 2014. Т. 1. С. 176–183.

Литература

1. Козлов А.С., Гатчин Ю.А. Разработка решений для вывода информационной системы из эксплуатации // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'14. Научное издание в 4-х томах. М., 2014. Т. 3. С. 201–204.
2. Kozlov A.S., Gatchin Y.A. Development of solutions for a conclusion of the information system from exploitation // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies IS&IT'14. Scientific publication in 4 volumes. 2014. Vol. 4. P. 78..
3. Козлов А.С. Подходы к процессу вывода информационной системы из эксплуатации с обеспечением частичной доступности созданного информационного обеспечения // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 195–196.
4. Лабковская Р.Я., Козлов А.С., Пирожникова О.И., Гатчин Ю.А. Тенденции развития герконовой элементной базы // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'14. Научное издание в 4-х томах. М., 2014. Т. 3. С. 301–302.
5. Pirozhnikova O.I., Gatchin Y.A., Labkovskaya R.Y., Kozlov A.S. Trends of the development of reed element base // Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies IS&IT'14. Scientific publication in 4 volumes. 2014. Vol. 4. P. 81.
6. Пирожникова О.И., Козлов А.С., Лабковская Р.Я. Новые разработки в области герконовой элементной базы // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 201–202.
7. Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Коробейников А.Г. Моделирование динамики чувствительных элементов герконов систем управления // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: Сборник материалов.



Коптева Наталия Михайловна
Факультет естественнонаучный
Кафедра интеллектуальных технологий в гуманитарной сфере
E-mail: nk_sportgirl@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ВЫБОРА МУЗЫКАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ В МУЗЫКАЛЬНУЮ ШКОЛУ

Н.М. Коптева

Научный руководитель – доцент А.Н. Шиков

В проекте ставится вопрос о возможности и принципах создания информационных методических ресурсов для системы контроля слуховых возможностей абитуриентов, поступающих в музыкальные школы [1].

Учитывая актуальность вопроса диагностики нарушений слуха и важность решаемой задачи, автором работы поставлена цель: разработать модель информационной системы поддержки принятия решений выбора музыкального инструмента.

Применение метода

Идея применения метода тональной аудиометрии в данном исследовании возникла из-за высокой схожести зависимости исследуемых частот и громкости и диапазона частот музыкальных инструментов [2]. Аудиометрические исследования дают оценку слуха на

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

диапазоне частот от 125 до 8000 Гц. Для базы частот музыкальных инструментов требуется представление обо всем слуховом диапазоне. Поэтому при проектировании метода воспользуемся расширенным диапазоном от 20 до 20 тыс. Гц [3].

Переход от графика-аудиограммы, исследуемого в медицине, к аудиограмме для исследования слуха стал возможным благодаря использованию новейших технологий.

Исходя из выявленных ранее требований, было принято решение реализовывать систему в виде программно-аппаратного комплекса. Это обусловлено тем, что необходимо генерировать звуковую волну и реагировать на моменты, когда испытуемый слышит подаваемый сигнал, который и является порогом слышимости на определенной частоте [4]. Более того, должно быть два интерфейса: один для экзаменатора, где выведены настройки программного обеспечения, а второй – для испытуемого с кнопками управления. На рис. 1 представлена схема программно-аппаратной части системы.



Рис. 1. Схема программно-аппаратного комплекса

Описание метода анализа аудиограммы

Условно процесс анализа аудиограммы происходит по следующей схеме. Первым этапом проводится предобработка, вторым – выделение интересующих областей и последним – сравнение с оригиналом.

Поскольку метод основан на сравнении аудиограммы с эталоном, а эталонная аудиограмма одна для каждого уха, то аудиограммы, записанные для каждого уха, объединяются по наихудшему варианту [5]. Другими словами, из двух значений громкости берется то, которое больше. Это обусловлено тем, что, если человек слышит хорошо одним ухом, но плохо другим, это отклонение отрицательно влияет на игру на музыкальном инструменте.

Затем происходит этап предобработки сигнала. Дело в том, что внутри системы аудиограмма хранится как двумерный массив, состоящий из двух столбцов: первый – частота, второй – громкость. Для удобства построения аудиограммы частота не является непрерывным параметром, а задается дискретно с шагом, указанным преподавателем. Однако для дальнейшей обработки этого недостаточно, поэтому при анализе используется новая шкала частоты с постоянным шагом 1 Гц. Для того чтобы привести громкость к новой частоте, она интерполируется функцией кусочно-линейной интерполяции. Суть этого метода в том, что промежутки между двумя соседними точками заполняются значениями, лежащими на соединяющей их линии.

Описание аппаратной части

Всю аппаратную часть можно условно разделить на два независимых модуля: генерации звука на определенной частоте с повышением уровня и пульт управления [6]. Если модуль генерации включает в себя стандартное оборудование, используемое по прямому назначению, то пульт испытуемого имеет ряд технологических нововведений.

После исследования предметной области к пульту были сформированы следующие требования:

- низкая стоимость;
- высокая скорость поставки компонентов;
- внешняя эстетичность;
- использование USB-интерфейса;
- эргономичность;
- устойчивость к истиранию и падениям с высоты до 3 м;
- наличие двух кнопок без фиксации;
- совместимость с ОС Windows без использования специальных драйверов.

Учитывая эти требования, было решено изготовить пульт на основе контроллера клавиатуры и двух кнопок, вынесенных в отдельные корпуса цилиндрической формы.

Принципиальная схема разработанного пульта представлена на рис. 2.

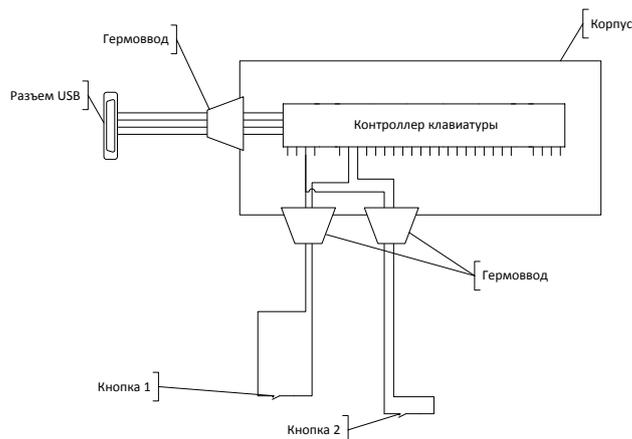


Рис. 2. Схема пульта управления

Программная реализация информационной системы осуществлена в программе LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) компании National Instruments. В ней можно выделить исполнимый основной файл, G-диаграмма которого представлена на рис. 3. На рис. 4 представлен интерфейс пользователя основной программы.

Заключение

В проекте реализована система поддержки принятия решений выбора музыкального инструмента, произведен поиск и анализ существующих музыкально-компьютерных технологий. Были разработаны схемы работы системы и программно-аппаратного комплекса, произведен поиск программной основы и выбрана среда программирования виртуальных приборов LabVIEW. Выбран наиболее подходящий метод разработки аудиометра – метод тональной аудиометрии, который с помощью сигналов различных частот и громкостей строит кривую (аудиограмму) слуха [7]. Для ее анализа построен метод интеллектуального анализа данных, основанный на базе знаний частотных диапазонов музыкальных инструментов [8]. В программной среде LabVIEW спроектирован прибор, генерирующий сигнал, и разработана программа регистрации слуха и принятия решений выбора музыкального инструмента. Проведен аналитический обзор аналогов музыкально-компьютерных программ, сформированы критерии и система оценок. Также проведено исследование традиционных методик поступления в музыкальную школу, что послужило отправной точкой в создании модифицированного варианта.

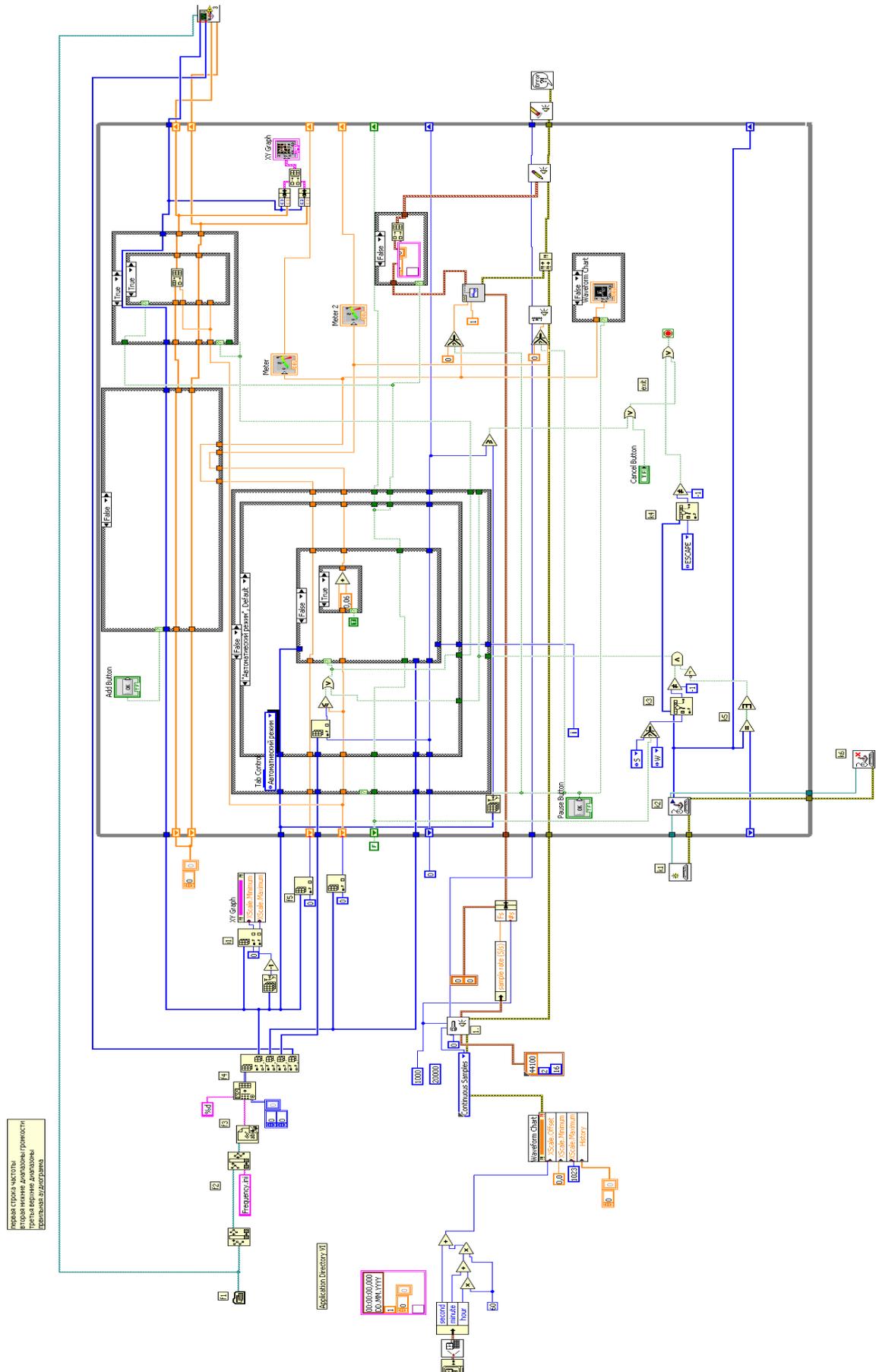


Рис. 3. G-диаграмма основной программы

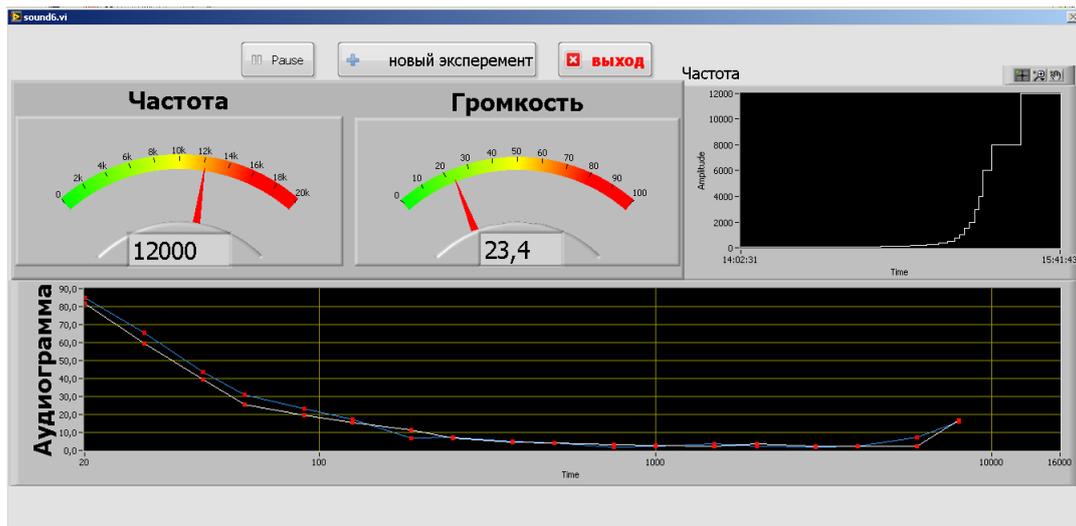


Рис. 4. Интерфейс аудиометра

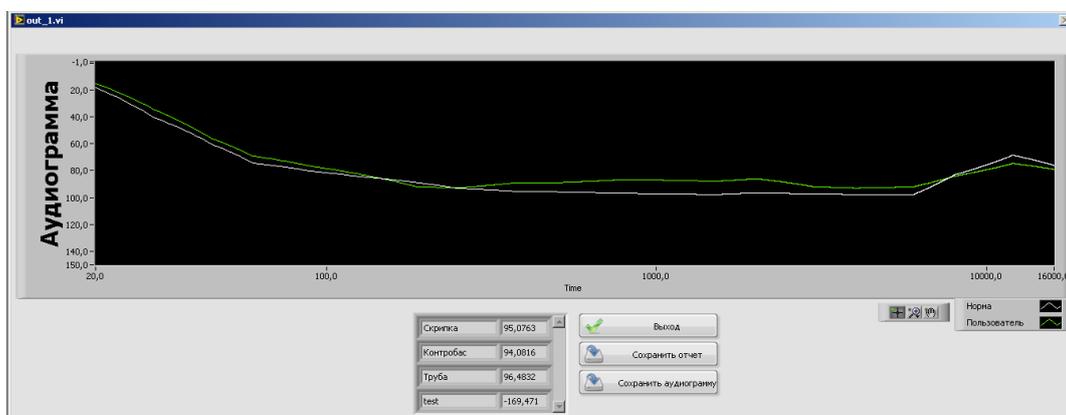


Рис.5. Интерфейс подпрограммы интеллектуального анализа данных

Публикации

1. Коптева Н.М., Шиков А.Н. Моделирование информационной системы поддержки принятия решения выбора музыкального инструмента для поступающих в музыкальную школу // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2014. С. 13–14.
2. Коптева Н.М., Шиков А.Н. Моделирование процессов выбора музыкального инструмента на основе объективных данных слуха ребенка // Актуальные вопросы образования и науки: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 декабря 2013 г.: в 14 частях. Ч. 14. Тамбов, 2014. С. 52–54.

Литература

1. Березовский Б.Л. К методике выявления музыкальных способностей детей // Вопросы психологии. 1992. № 5. С. 94–100.
2. Бондаренко Р.П. Исследование методов статистического анализа данных тональной аудиометрии и разработка на их основе системы диагностики нарушений слуха: Дисс. к. т. н. Таганрог, 2011. – 189 с.
3. Акустические сигналы. Динамический диапазон. Частотный диапазон [Электронный ресурс] // Музыкальная акустика [интернет-портал]. URL: <http://paintpit.ru/akusticheskie-signalny-dinamicheskii-diapazon-chastotnyi-diapazon.html> (дата обращения: 10.05.2014).
4. Анисимов В.П. Диагностика музыкальных способностей детей. М., 2004. – 130 с.
5. О слухе. Причины снижения слуха и методы выявления [Электронный ресурс] // DeafNet [Интернет-портал]. URL: <http://surdo.deafnet.ru/info.phtml?c=72&id=113> (дата обращения: 25.12.2013).

6. Физические параметры звука [Электронный ресурс] // Мир звука [интернет-портал]. URL: <http://infrazvuk.info/fizicheskie-parametry-zvuka/> (дата обращения: 20.04.2014).
7. Балуева З.В. Инновационные методы обучения музыке в учреждении дополнительного образования (на примере детской музыкальной школы) [Электронный ресурс] // V Международная студенческая электронная научная конференция «Студенческий научный форум» 15 февраля – 31 марта 2013 года [Официальный сайт]. URL: <http://www.scienceforum.ru/2013/279/4288> (дата обращения: 15.05.2014).
8. Памятка музыканту: частоты. Частоты, которые полезно помнить [Электронный ресурс]. URL: http://mcstore.ru/pamjatka_muzikantu_chastoti_chastoti_kotorie_polezno_pomnit.htm (дата обращения: 15.05.2014).



Копылов Дмитрий Сергеевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра компьютерных образовательных технологий
E-mail: dima@cde.ifmo.ru

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ОПТИКО-ЦИФРОВОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ТЕЛЕМЕДИЦИНСКОГО КОМПЛЕКСА

Д.С. Копылов

Научный руководитель – доцент А.В. Лямин

Цель проекта – разработка и внедрение в состав оптико-цифрового диагностического телемедицинского комплекса веб-приложения для предоставления удаленного доступа к его данным через интернет. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ и выбор технологий разработки;
- спроектировать и разработать модули:
 - удаленного наблюдения и управления медицинскими системами комплекса,
 - дистанционного обучения,
 - доступа к результатам исследований,
 - администрирования;
- внедрить в комплекс веб-приложение;
- разработать эксплуатационную документацию;
- провести испытания.

Университет ИТМО совместно с ОАО «ЛОМО» в 2010 г. выиграл конкурс в рамках Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 [1] по разработке оптико-цифрового диагностического телемедицинского комплекса (КОЦДТ) [2]. Он состоит из трех систем: цифровой микровизионной, видеоэндоскопической и сетевой. Цель разработки КОЦДТ – повышение качества и доступности высокотехнологичной медицинской помощи в удаленных от крупных медицинских центров областях. Повышение качества достигается, в том числе за счет применения в КОЦДТ современных инфокоммуникационных технологий и приложений.

Комплекс состоит из трех систем:

- сетевой, предназначенной для хранения, обработки и передачи медицинских данных;
- микровизионной – цифрового автоматизированного микроскопа;

– видеоэндоскопической, предназначенной для диагностики и лечения органов желудочно-кишечного тракта.

В рамках сетевой системы были разработаны программное обеспечение для ведения электронной персональной медицинской записи о пациенте (база данных диагностических исследований (БДДИ)) и специализированный видеосервер для передачи видео-потока и управления медицинскими системами в локальной сети комплекса. Задача данной работы – предоставить удаленный доступ к КОЦДТ через интернет. Под удаленным доступом подразумевается следующее:

– возможность удаленного наблюдения и управления медицинскими системами через веб-браузер;

– просмотр результатов исследований (фото, видео и других материалов) из БДДИ, доступ предоставляется к обезличенным результатам исследований.

На начальном этапе проведена выработка функциональных требований к веб-приложению:

- ведение списка пользователей и разграничение прав доступа;
- подключение к видеосерверу для выполнения функций пассивного клиента микровизионной и видеоэндоскопической систем;
- работа в веб-браузере, в том числе на современных мобильных устройствах;
- возможность проведения опросов пользователей при прямых трансляциях с медицинских систем с возможностью голосового общения;
- доступ к результатам проведенных исследований из БДДИ.

Были проанализированы существующие технологии разработки веб-приложений. Анализ осуществлялся с применением метода анализа иерархий [3]. В результате в качестве серверной технологии разработки выбран стек технологий Java EE, а в качестве клиентской – связка HTML5 и JavaScript.

Для поддержки голосового общения при дистанционном обучении в веб-приложение интегрирована поддержка платформы вебинаров, в качестве которой после проведенного сравнительного анализа выбрана BigBlueButton.

На основании анализа задачи и определения функциональных требований определены модули, из которых состоит веб-приложение.

1. Модуль администрирования необходим для управления пользователями подключаемым оборудованием и для выполнения служебных задач, таких как интеграция с платформой вебинаров BigBlueButton.

2. Модуль прямых трансляций обеспечивает взаимодействие с видеосервером как пассивный клиент, преобразует видеопоток, состояния и команды управления для отображения в веб-браузере, представляет интерфейс для пользователя, взаимодействует с модулем администрирования в части определения роли текущего пользователя.

3. Модуль обучения необходим для проведения опросов обучаемых, подведения статистики ответов. Он взаимодействует с модулем администрирования в части определения роли текущего пользователя и с модулем прямых трансляций в части отображения интерфейса управления лабораторного оборудования.

4. Модуль доступа к результатам исследований предоставляет доступ к данным, хранящимся в БДДИ.

Определены роли пользователей в соответствии с задачами, которые они решают при работе с веб-приложением.

Наблюдатель имеет доступ к модулю прямых трансляций в части просмотра трансляций; к модулю обучения в части ответов на вопросы и просмотра своей статистики; к модулю доступа к результатам исследований в части просмотра исследования, к которому у него есть доступ.

Лаборанту разрешен доступ к модулю прямых трансляций в части управления ими; к модулю обучения в части составления вопросов, сценариев тестирования и просмотра

статистики по всем ученикам; к модулю доступа к результатам исследований в части управления доступом пользователей;

Администратор имеет доступ ко всем модулям.

На основании списка модулей и ролей пользователей определены варианты использования веб-приложения для каждой роли.

Для модуля прямых трансляций разработан алгоритм управления лабораторным оборудованием с возможностью работы на мобильных устройствах. Для него выдвинуты следующие требования: возможность отображения на мобильном устройстве; отсутствие подключаемых модулей к веб-браузеру; обратная связь с видеосервером; возможность передачи дополнительной информации (состояние приборов); передача изображения без повторного сжатия для повышения качества и возможность проксирования веб-сервером. На рисунке представлена диаграмма последовательности в нотации UML, иллюстрирующая данный алгоритм.

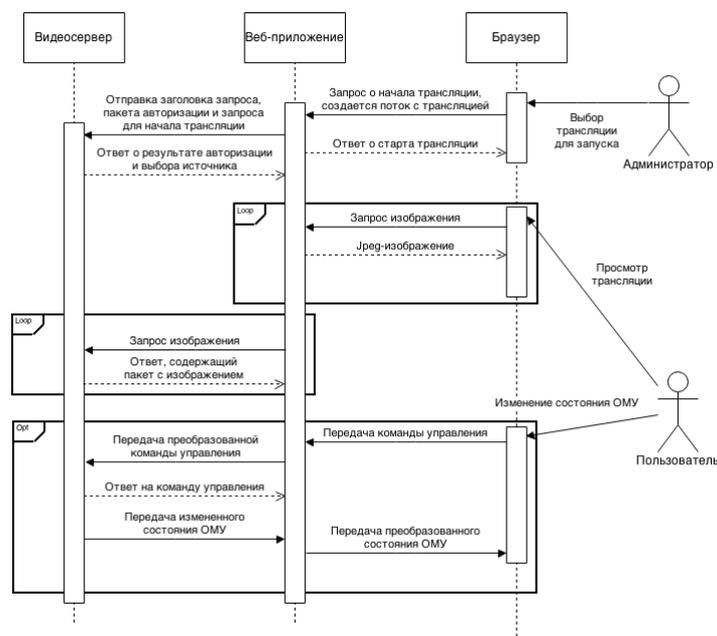


Рисунок. Диаграмма последовательности алгоритма удаленного управления, ОМУ – оптико-механические узлы

Веб-приложение хранит список пользователей, источников, трансляций, вопросов и сценариев тестирования в базе данных MySQL. Оно реализовано в виде широко распространенной в настоящее время трехзвенной архитектуры, где в качестве слоя данных используется MySQL, слоя логики – сервлеты в Apache Tomcat, слоя клиента – веб-браузер на компьютере пользователя.

На основании выбора технологий разработки и проектирования веб-приложения разработан исходный код серверной части веб-приложения. Он написан на языке программирования Java и технологии Java EE. На основе структуры приложения, определены основные пакеты исходного кода:

- «servlets» – сервлеты;
- «tools» – утилиты;
- «model» – представление данных;
- «dao» – доступ к данным;
- «admins» – модуль администрирования;
- «online» – модуль прямых трансляций;
- «education» – модуль обучения;
- «researches» – модуль доступа к результатам исследований;

В соответствии с выбором клиентской технологии разработки, клиентская часть выполнена с применением:

- языка разметки HTML5;
- языка программирования JavaScript;
- каскадных таблиц стилей CSS3;
- библиотеки jQuery;
- технологии AJAX для асинхронного обмена с сервером;
- библиотеки шаблонов пользовательских элементов Twitter Bootstrap.

Работа клиентской части построена следующим образом:

- при переходе пользователя на страницу модуля выполняется загрузка главной ее страницы с подключением JavaScript-файлов данного модуля;
- все действия пользователя обрабатываются на странице в функциях JavaScript;
- запрос на сервер для получения данных выполняется с помощью AJAX без перезагрузки страницы.

Веб-приложение функционирует на сервере сетевой системы КОЦДТ под управлением Microsoft Windows Server 2008. Сервер соединен с маршрутизатором, к которому подключаются остальные системы комплекса. Маршрутизатор обеспечивает разграничение доступа из внешней сети медицинского учреждения к ресурсам комплекса. Для работоспособности веб-приложения на маршрутизаторе с помощью технологии NAT настроено перенаправление TCP-порта № 443 на IP-адрес сервера.

Внедрение разработанного веб-приложения заключалось в установке необходимого программного обеспечения (контейнер сервлетов Apache Tomcat и СУБД MySQL) на сервер СС и конфигурировании веб-приложения для работы в среде СС. Конфигурирование заключалось в создании базы данных в СУБД из дистрибутива и установлении в конфигурационных файлах необходимых настроек. Разработанное веб-приложение протестировано по разработанной программе и методике испытаний. По результатам успешных испытаний составлен протокол.

Заключение

Разработано веб-приложение для оптико-цифрового диагностического телемедицинского комплекса. Оно предоставляет удаленный доступ к данным телемедицинского комплекса через интернет: наблюдение за ходом эндоскопического исследования, удаленное управление автоматизированным цифровым микровизором, доступ к результатам медицинских исследований.

В результате работы:

- определены функциональные требования к веб-приложению;
- на основании метода анализа иерархий выбраны технологии разработки;
- выбрана платформа для организации вебинаров;
- определены варианты использования;
- разработан алгоритм управления лабораторным оборудованием с возможностью работы на мобильных устройствах;
- спроектирована структура приложения и база данных;
- разработана серверная и клиентская части;
- произведена интеграция веб-приложения в комплекс;
- проведены испытания на основании разработанных программы и методики, составлен протокол.

Использование разработанного веб-приложения существенным образом повысит качество предоставления медицинских услуг в удаленных регионах Российской Федерации.

Публикации

1. Копылов Д.С., Устинов С.Н., Скуидлевский А.А., Лямин А.В. Сетевые сервисы оптико-цифрового диагностического телемедицинского комплекса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 124–129.

2. *Лямин А.В., Копылов Д.С.* Система единого входа в гетерогенных образовательных системах // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2012. С. 119–123.
3. *Лямин А.В., Скишдлевский А.А., Копылов Д.С.* Разработка системы сетевой оптико-цифрового диагностического комплекса для телемедицины // Труды XIX Всероссийской научно-методической конференции Телематика'2012. СПб., 2012. Т. 2. С. 294–295.
4. *Копылов Д.С., Лямин А.В., Скишдлевский А.А.* Технология организации видеотрансляций медицинских исследований с возможностью отображения на мобильных устройствах // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 159–162.
5. *Копылов Д.С., Скишдлевский А.А., Лямин А.В.* Телекоммуникационные возможности диагностического телемедицинского комплекса // Математическое и компьютерное моделирование в биологии и химии. Перспективы развития: II Международная научная Интернет-конференция: материалы конф. (Казань, 24 сентября 2013 г.): в 2 т. Казань, 2013. Т. 1. С. 95–97.
6. *Копылов Д.С.* Возможности телемедицинского комплекса для проведения удаленного обучения // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2014. С. 205–207.
7. *Копылов Д.С., Лямин А.В.* Контекстный подход при обучении студентов разработке сетевых приложений // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 111–112.

Литература

1. Постановление Правительства РФ «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» от 9 апреля 2010 г. № 218.
2. *Гуров И.П., Никифоров В.О., Потапов А.С., Белашенков Н.Р., Лямин А.В., Рудин Я.В., Скишдлевский А.А., Варламова Л.Л.* Диагностический оптико-цифровой комплекс для телемедицины // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 11. С. 47–52.
3. *Саати Т.Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. М., 1989. – 316 с.



Котова Екатерина Ильинична
Факультет инженерно-физический
Кафедра твердотельной оптоэлектроники
E-mail: cath.kotova@yandex.ru

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИМЕТР НА ОСНОВЕ ПАДАЮЩЕЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Е.И. Котова

Научный руководитель – профессор А.Л. Дмитриев

Целью проекта является создание новых измерительных приборов – высокочастотных гравиметров, предназначенных для измерений высокочастотных (диапазона десятков-сотен герц и более) флуктуаций напряженности гравитационного поля Земли.

Актуальность данной проблемы обусловлена большими научным и практическим значениями высокочастотной гравиметрии (ВЧ-гравиметрии). С научной точки зрения она дает возможность получать новую ценную информацию о сложных, ранее неизученных,

геофизических процессах, происходящих в ядре, мантии и коре Земли. С точки зрения практики – создаваемые в ходе освоения и развития ВЧ-гравиметрии новые измерительные приборы будут способствовать усовершенствованию методик и аппаратуры поиска полезных ископаемых (нефти, газа, редких металлов) и предупреждения природных катастроф – землетрясений, цунами, селей, оползней.

Конкретная задача, на решение которой направлен проект, состоит в создании высокочастотного баллистического гравиметра с предельно малой (менее 1 мм) длиной траектории падения пробного тела, выполненного на основе падающей голографической дифракционной решетки.

Современные гравиметры отличаются высокой точностью измерений (порядка единиц мкГал). Однако эти показатели, как правило, достигаются вследствие усреднения значительного числа выборочных данных, то есть большим временем накопления регистрируемых сигналов (от десятков секунд до суток). Очевидно, при таких методиках измерений ценная информация о высокочастотных (диапазона свыше десятков-сотен герц) колебаниях напряженности гравитационного поля Земли практически теряется. Между тем именно эти ВЧ-колебания сопутствуют либо предшествуют катастрофическим природным явлениям и содержат ценную информацию о динамических физических процессах в объеме Земли.

Принцип действия обычного баллистического гравиметра состоит 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. В лазерном баллистическом гравиметре (ЛБГ) закрепленный на пробном теле оптический уголкового отражателя (трипель-призма) является составной частью интерферометра Майкельсона, и в ходе измерений выполняется счет интерференционных полос, перемещающихся вдоль фотодетектора за заданный отрезок времени [1, 2]. Такие приборы отличаются высокой точностью измерений, а их усовершенствование связано с рядом принципиальных затруднений, среди которых одним из главных является большая (десятки сантиметров) длина траектории падения пробного тела. Сравнительно большое время падения пробного тела существенно ограничивает временную разрешающую способность ЛБГ, и такие гравиметры нельзя использовать для измерения высокочастотных (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 и аппаратуры предупреждения природных катастроф (землетрясений, оползней, цунами). Рассмотрим новый тип ЛБГ, в оптической схеме которого использована пропускающая голографическая дифракционная решетка и в котором длина траектории падения пробного тела составляет доли миллиметров.

Принцип действия ЛБГ с голографической дифракционной решеткой

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. Фаза $\varphi(z)$ дифрагирующей волны представляется выражением:

$$\varphi(z) = \varphi_0 + \frac{2\pi}{\lambda} z(\sin \alpha + \sin \beta), \quad (1)$$

где λ – длина волны света, z – координата в плоскости голограммы и углы падения α и дифракции β показаны на рисунке. При движении голограммы вдоль оси z со скоростью v фаза $\varphi(z)$ изменяется во времени, что соответствует сдвигу f частоты волны, равному

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{v}{\lambda} (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (2)$$

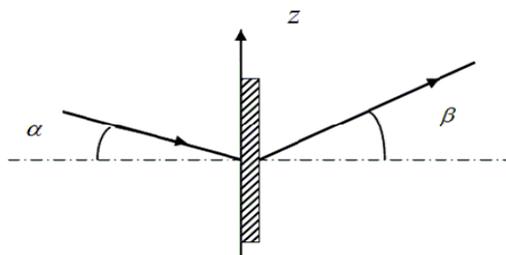


Рис. 1. Геометрия дифракции света на пропускающей голографической дифракционной решетке

Период d дифракционной решетки равен:

$$d = \frac{\lambda}{\sin \alpha + \sin \beta} \quad (3)$$

и выражение (2) принимает простой вид $f = v/d$.

Если решетка движется вдоль z с ускорением $g = \partial v / \partial t$,

$$g = d \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) = \frac{\lambda}{\sin \alpha + \sin \beta} \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) \quad (4)$$

Примечательно, что для расчета ускорения g согласно (4) нет необходимости точного измерения расстояний, проходимых движущейся голографической решеткой. В баллистическом гравиметре, использующем описанный принцип измерений ускорения свободного падения, достаточно определить параметр $\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)$ регистрируемого частотно-модулированного сигнала биений.

В ходе выполнения проекта:

- разработаны три варианта оптических схем мультиплексирования (когерентного наложения) пучков света в баллистическом гравиметре с падающей голографической дифракционной решеткой, в том числе с использованием зеркал и светоделителя;
- выполнены расчет специальной призмы полного внутреннего отражения (ПВО);
- предложен мультиплексор в виде двух последовательно расположенных голографических решеток.

Варианты оптических схем гравиметра представлены на рис. 2, 3 и 4. Их анализ позволяет оптимизировать предложенную конструкцию [3, 4].

При наложении пучков света, дифрагирующих на голограмме в нулевом и первом порядках дифракции, в результате интерференции света возникает частотно-модулированный сигнал биений, регистрируемый осциллографом. Примеры таких сигналов приведены на рис. 5.

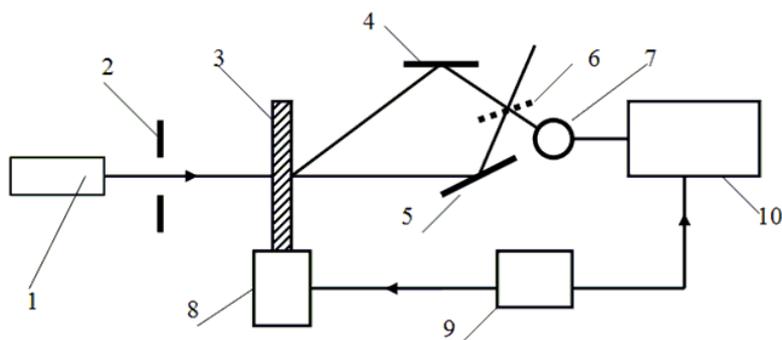


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – голограмма, 4, 5 – зеркала, 6 – светоделитель, 7 – фотодиод, 8 – электромеханическая катапульта, 9 – электронное устройство управления катапультой, 10 – цифровой осциллограф

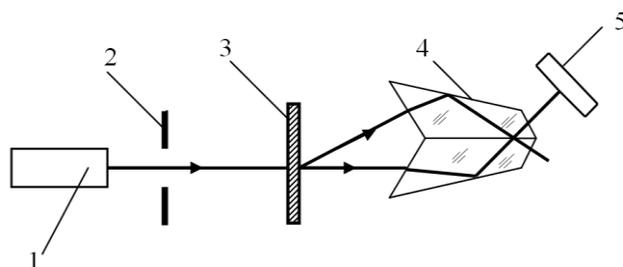


Рис.3. Оптическая схема гравиметра с использованием призмы ПВО: 1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – голограмма, 4 – призма ПВО, 5 – фотодиод

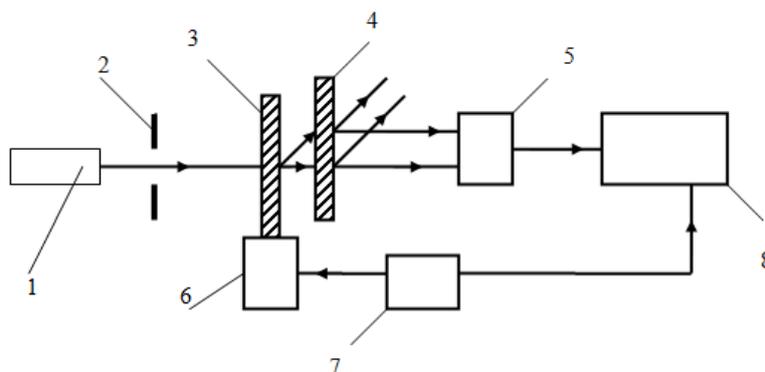


Рис. 4. Схема оптической экспериментальной установки гравиметра на основе двух последовательно расположенных голограмм: 1 – лазер, 2 – диафрагма, 3 – голограмма, 4 – неподвижная голограмма, 5 – фотодиод, 6 – электромеханическая катапульта, 7 – электронное устройство управления катапультой, 8 – цифровой осциллограф

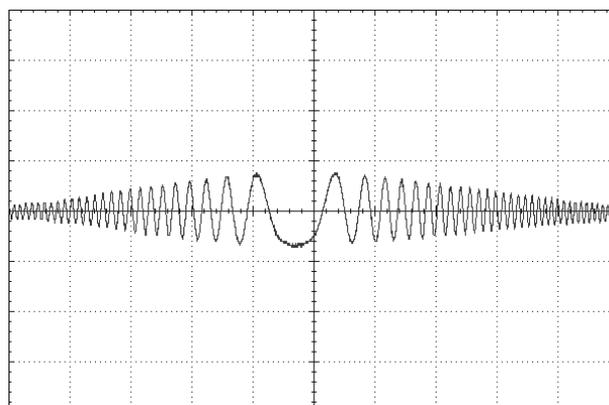


Рис. 5. Пример сигнала биений, регистрируемый осциллографом OWON

По частотно-модулированным сигналам биений выполнен расчет величины ускорения свободного падения пробного тела. Полученные значения соотносятся с ожидаемыми величинами и обладают достаточной точностью для данного этапа проводимых исследований. Предусматривается усовершенствование электронно-оптической схемы гравиметра и достижение более высоких значений отношения сигнал/шум на выходе интерферометра.

Результаты проекта будут использованы в разработках новой высококачественной аппаратуры для исследования геофизических процессов в ядре и коре Земли, в гравirazведке, при решении задач разведки месторождений нефти и газа, усовершенствовании методик и аппаратуры предупреждения природных катастроф (землетрясений, цунами).

Публикации

1. Котова Е.И. Баллистический гравиметр на основе падающей голографической дифракционной решетки // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 28.
2. Дмитриев А.Л., Котова Е.И., Никущенко Е.М., Смирнова А.Л., Прокопенко В.Т. Баллистический гравиметр на основе падающей голографической дифракционной решетки // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 117. № 5. С. 110–111.

Литература

1. Торге В. Гравиметрия. М., 1999. – 429 с.
2. Грушинский Н.П. Основы гравиметрии. М., 1983. – 352 с.
3. Котова Е.И. Баллистический гравиметр на основе падающей голографической дифракционной решетки // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 28.
4. Дмитриев А.Л., Котова Е.И., Никущенко Е.М., Смирнова А.Л., Прокопенко В.Т. Баллистический гравиметр на основе падающей голографической дифракционной решетки // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 117. № 5. С. 110–111.



Коцюба Игорь Юрьевич
Естественнонаучный факультет
Кафедра интеллектуальных технологий в гуманитарной сфере
E-mail: igor.kotciuba@gmail.com

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ УЧЕБНОГО ПЛАНА ДЛЯ ВУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ

И.Ю. Коцюба

Научный руководитель – доцент Н.Ф. Гусарова

В работе рассматриваются методы и алгоритмы поддержки принятия решений при разработке учебного плана вуза с применением нечетких когнитивных карт.

Введение

Современное высшее образование должно отвечать высоким и быстро изменяющимся требованиям. Согласно Федеральному стандарту высшего профессионального образования (ФГОС ВПО) [1], вузы должны ежегодно обновлять основные образовательные программы (ООП) с учетом изменений науки, техники, технологий, культуры, экономики, социальной сферы.

ФГОС ВПО дает информацию о количестве зачетных единиц, отводимых на базовую и вариативную части рабочего учебного плана, однако не регламентирует распределение зачетных единиц по конкретным дисциплинам. В то же время [2, 3] в высших учебных заведениях экспертные оценки заведующих кафедрами, а также опыт и интуиция преподавателей, основывающихся на субъективных мнениях о месте и роли каждой дисциплины, при соблюдении образовательных стандартов определяют последовательность их изучения.

В процессе решения проблемы проектирования и перепроектирования учебных планов, возникающей вследствие их вариативности, необходимо учитывать мнения многих экспертов, в том числе администрации вуза, студентов и работодателей.

Таким образом, принятие решений при проектировании и управлении учебными планами в сфере ВПО должно сочетать формальные и экспертные показатели. По данным исследований, наибольшие трудности вызывает оптимизация учебных планов. В свою очередь, при их составлении требуется оценить относительную трудоемкость каждой дисциплины и определить оптимальную последовательность их изучения. Эти задачи решаются в условиях неформальности многих критериев, неполноты учитываемой информации и во многом зависят от экспертных данных. Для определения последовательности изучения дисциплин можно также построить граф, отображающий логику их изучения.

Основные понятия теории нечетких когнитивных карт

Когнитивный подход – один из перспективных подходов к принятию решений, ориентированный на то, чтобы активизировать мыслительные процессы человека и помочь ему зафиксировать свое представление о проблеме в виде формальной и в значительной степени субъективной модели – когнитивной карты. Если формальная запись когнитивной карты является собой граф, в котором концепты предметной области представляют собой его узлы, а логические связи между концептами – ребра, то в нечетких когнитивных картах ребрами графа являются причинно-следственные связи между концептами. Они указывают направление влияния одного концепта на другой и степень этого влияния, представляющую собой нечеткое множество.

Составление нечетких когнитивных карт экспертами, принимающими участие в разработке учебного плана

В настоящее время прогнозирование развития систем связано с необходимостью проведения экспертиз – использованием оценок группы экспертов данной предметной области. Удобным способом консолидации знаний большой и неоднородной группы экспертов является математический аппарат когнитивных карт и их разновидности – нечетких когнитивных карт. Когнитивная карта имеет вид знакового ориентированного графа.

Для формализации представления о предметной области каждому эксперту предлагается построить свою нечеткую когнитивную карту. Для этого используется метод анкетирования. Основными вопросами, на которые необходимо ответить эксперту, являются вопросы типа: «В какой степени выражается влияние каждой учебной дисциплины на профессиональную подготовку в целом? Существует ли влияние одной учебной дисциплины на другую, и в какой степени оно выражается?». Компоненты отношения задают степень

влияния одной учебной дисциплины на другую и степень влияния учебной дисциплины на профессиональную подготовку в целом: 0 – влияние отсутствует, 0,1 – практически отсутствует, 0,3 – слабое, 0,7 – существенное, 0,9 – сильное, 1 – максимально возможное.

Когнитивные карты направлены на решение таких проблем, как:

- визуализация знаний эксперта в виде структуры причинно-следственных влияний концептов, определяющих объект исследования;
- представление знаний эксперта в структурированном виде;
- определение согласованности мнений группы экспертов или выявление отклонений в мнениях разных экспертов или групп экспертов;
- анализ слабоструктурированной системы с использованием метода имитационного моделирования, поддержка управленческих решений;
- формирование ограничений анализируемой предметной области в рамках поставленных целей анализа и определение единой понятийной системы (онтологии) для коллектива экспертов, принимающих участие в этом процессе;
- облегчение работы экспертов за счет наглядности представления взаимосвязей между концептами на основе средств когнитивной графики;
- высокая скорость разработки;
- возможность удаленной работы экспертов;
- отсутствие необходимости привлечения большого количества специалистов-разработчиков моделей;
- разнообразие и большая распространенность инструментальных средств когнитивного моделирования.

Анализ нечетких когнитивных карт экспертов

На следующем этапе определяется опосредованное влияние между концептами нечеткой когнитивной карты, то есть формализуется взаимовлияние между учебными дисциплинами в учебном плане. Для этого используется процедура транзитивного замыкания когнитивной матрицы.

Далее необходимо проанализировать структуру модели, в том числе с использованием симплицеального анализа (q -анализа связности), позволяющего обнаружить глубинную связь между симплексами когнитивной карты, которая не очевидна на графе.

В отличие от традиционных исследований связности графа, метод q -анализа позволяет судить о связности системы более глубоко, поскольку при этом устанавливается наличие взаимовлияния симплицеальных блоков системы через цепочку связей между ними. На основании таких возможностей предлагаются формализованные правила обоснования целевых и управляющих вершин, определение структурной устойчивости систем и условий для ее достижения. Q -анализ связности системы позволяет выявлять симплексы, более всего влияющие на процессы в системе, образующие вершины которых рациональнее выбирать в качестве управляющих; оценить влияние определенных локальных изменений как на структуру системы, так и на другие ее симплексы.

Подход, основанный на построении нечетких когнитивных карт и методах экспертного оценивания, позволяет формализовать и проанализировать критерий полезности учебного плана, а именно: суммарная полезность учебной дисциплины может быть рассчитана после процедуры транзитивного замыкания когнитивной матрицы как сумма всех степеней влияний.

Тогда математическая модель задачи максимизации суммарной полезности учебного плана может быть сформулирована как задача о ранце в виде:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m x_i * u_i \rightarrow \max$$

$$D = \{x \in R^n \mid \sum_{i=1}^m x_i \leq V; x \in Z_+\}; a \leq x_i \leq b,$$
$$Z_+ = \{0\} \cup N,$$

где V – общее количество зачетных единиц, отведенных на изучение дисциплин; u_i – полезность зачетной единицы i -й учебной дисциплины; a – минимальное, b – максимальное количество зачетных единиц на изучение дисциплины, Z_+ – множество целых чисел.

Выводы

Разработанные методы позволяют значительно облегчить процесс принятия решений и достаточно эффективно поддержать процесс разработки учебного плана вуза. Применение спроектированной системы поддержки принятия решений позволит значительно сократить временные затраты при разработке учебного плана, что достигается за счет возможности удаленной работы экспертов, формализации и сбора их оценок в разные периоды времени.

Публикации

1. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О., Гусарова Н.Ф. Система поддержки принятия решений при разработке учебного плана вуза, основанная на применении нечетких когнитивных карт // Дистанционное и виртуальное обучение. 2014. № 3. С. 108–119.
2. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О., Гусарова Н.Ф. Методика поддержки принятия решений при разработке индивидуального учебного плана студента высшего учебного заведения, основанная на применении нечетких когнитивных карт // Инновации в образовании. 2014. № 9. С. 147–160.
3. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О., Гусарова Н.Ф. Применение нечетких когнитивных карт для поддержки принятия решений при разработке рабочего учебного плана высшего учебного заведения на основе учебного плана // Открытое образование. 2014. № 2. С. 66–71.
4. Коцюба И.Ю., Кайсарова Д.В., Жогина В.А. Приложение для создания тестовых заданий в формате интеллект-карт // Дистанционное и виртуальное обучение. 2013. № 10. С. 59–63.
5. Коцюба И.Ю., Кайсарова Д.В. Использование интеллект-карт для длительного наблюдения за процессом усвоения обучающимися содержания дисциплины // Дистанционное и виртуальное обучение. 2014. № 4. С. 101–105.
6. Коцюба И.Ю., Шиков А.Н. Автоматизированный анализ интеллект-карт учащихся, применяемых для оценки усвоения учебного материала // Педагогическая информатика. 2014. № 3. С. 25–31.
7. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О. Методы поддержки принятия решений при разработке рабочего учебного плана вуза с использованием нечетких когнитивных карт // Современное гуманитарное образование: традиции, инновации, перспективы: материалы международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 11 апреля 2013 года). СПб., 2013. С. 98–102.
8. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О., Гусарова Н.Ф. Особенности применения нечетких когнитивных карт и методов оптимизации при составлении вариативной части рабочего учебного плана высшего учебного заведения // Информационные технологии в области науки и техники: материалы XI открытой научно-практической конференции учащихся, студентов и аспирантов. СПб., 2013. С. 27–29.
9. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О. Применение нечетких когнитивных карт и методов оптимизации для разработки рабочего учебного плана высшего учебного заведения // Сборник трудов молодых ученых и сотрудников кафедры ВТ. СПб., 2013. С. 29–31.
10. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О. Система поддержки принятия решений при разработке рабочего учебного плана высшего учебного заведения, основанная на применении

когнитивных карт // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2013. С. 8–9.

11. Коцюба И.Ю., Артемова Г.О. Управление разработкой учебного плана высшего учебного заведения с использованием нечетких когнитивных карт // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 175–177.

12. Коцюба И.Ю., Шиков А.Н. Метод анализа усвоения материала учащимися с использованием интеллект-карт // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 октября 2013 г.: в 26 частях. Ч. 2. Тамбов, 2013. С. 88–89.

Литература

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 080500 Бизнес-информатика (квалификация (степень) «магистр») от 21 декабря 2009 г. № 742 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ifmo.ru/file/spec/g113.pdf> (дата обращения: 01.06.2014).

2. Воробьева Н.А., Носков С.И. Программное обеспечение для автоматизации процесса разработки учебных планов // Фундаментальные исследования. 2012. № 6. Ч. 3. С. 633–636.

3. Глушченко А.И. Информационная система принятия решений по формированию индивидуальных учебных планов // Управление большими системами. 2006. № 15. С. 79–91.



Ластовская Елена Александровна
Факультет оптико-информационных систем и технологий
Кафедра оптико-электронных приборов и систем
E-mail: plastelinchik@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ГЛЮКОЗЫ В КРОВИ

Е.А. Ластовская

Научный руководитель – доцент А.Н. Чертов

Введение

В настоящее время спектральные методы анализа активно развиваются, внедряются и широко используются в различных сферах человеческой жизни. Внедрение методов оптической неинвазивной диагностики может открыть новые возможности в решении задач распознавания болезни на раннем этапе ее развития, диагностики состояния органов, а также обеспечить безболезненный контроль протекания заболевания.

Сахарный диабет – группа эндокринных заболеваний, развивающихся вследствие абсолютной или относительной недостаточности гормона инсулина, в результате чего развивается гипергликемия, стойкое увеличение содержания глюкозы в крови, нарушаются все виды обмена веществ [1]. Глюкометром называют устройство для измерения уровня сахара. Широко применяются электрохимические глюкометры, которые измеряют показатели гликемии в соответствии с величиной тока, появляющегося при реакции глюкозы крови со специальными веществами в тест-полоске. Диабетическим больным необходимо ежедневно проверять уровень сахара в крови, что является достаточно болезненной процедурой.

Исходя из объективной актуальности тематики, была определена цель научно-практических работ – исследование и создание макета оптико-электронной системы неинвазивного контроля глюкозы (далее – ОЭС НКГ).

Для достижения поставленной цели необходимо:

- выявить особенности поставленной задачи исследований;
- провести аналитический обзор существующих методов и средств неинвазивного контроля уровня сахара в крови;
- разработать структурную схему макета ОЭС НКГ и выбрать основные его элементы;
- разработать макет ОЭС НКГ и методику проведения измерений;
- провести экспериментальные исследования разработанного макета с использованием различных объектов исследования.

Особенности поставленной задачи

Оптическая неинвазивная диагностика (ОНД) предполагает использование оптического излучения для прижизненного зондирования тканей и органов пациента с целью получения по отраженному, рассеянному или прошедшему излучению диагностической информации о биохимическом составе и анатомическом (морфологическом) строении обследуемого участка мягких тканей тела пациента [2].

Основной спецификой любого прибора для неинвазивной медицинской спектрофотометрии (НМС) является наличие в нем вычислительной системы и интерпретирующих алгоритмов, которые дают возможность по массиву зарегистрированных первичных данных получить результат в виде конечных медико-биологических показателей. Аппаратные же средства прибора далее «подстраиваются» под вычислительный алгоритм таким образом, чтобы обеспечить в нужном объеме (в нужном спектральном диапазоне, с нужным пространственным и временным разрешением и т. д.) сбор, обработку и хранение необходимых данных.

С другой стороны, сами аппаратные средства в НМС не являются специфичными и оригинальными, поэтому задачи проектирования и конструирования отдельных узлов и блоков таких приборов и систем можно свести к стандартным задачам классического оптико-электронного приборостроения. Таким образом, все сводится к задаче соединения известных схмотехнических решений в единую целевую конструкцию прибора НМС [3].

Стоит отметить, что на замедление этапа внедрения НМС влияют необходимость тщательных клинических испытаний и сложность их проведения, а также вопросы точности измерений и стандартизации.

Более подробно стоит рассмотреть, помимо перечисленных, специфические особенности задачи неинвазивного измерения концентрации сахара в крови и выявить основные сложности в решении задачи создания ОЭС НКГ.

Кровь является жидкостью сложного состава, каждый компонент которой дает свой вклад в ее спектральные характеристики. Очевидно, что этот факт значительно усложняет процесс выявления глюкозы и определения ее концентрации. Низкая концентрация сахара относительно других элементов (рис. 1) также является фактором, усложняющим анализ. Помимо компонентов крови, при НМС мешающими факторами являются толщина и состояние кожного покрова, межтканевая жидкость, подкожно-жировая клетчатка и др. Также значимой сложностью в создании ОЭС НКГ является отсутствие характерных полос поглощения глюкозы в окнах пропускания других веществ [4].

Результаты теоретических исследований особенностей состава крови диабетических больных позволили сделать вывод о том, что такие величины, как содержание глюкозы, С-пептида, инсулина, гликированного гемоглобина в крови являются взаимно влияющими. Следовательно, можно говорить о возможности измерения уровня глюкозы в крови косвенным методом, по результатам измерения концентрации других веществ.

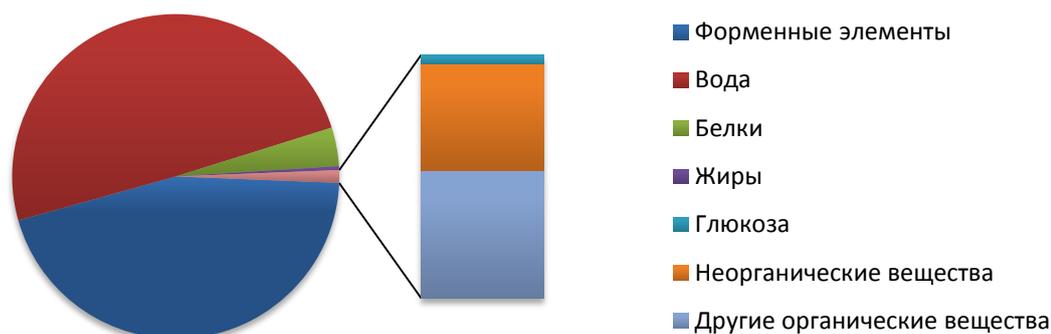


Рис. 1. Состав крови

Для решения проблемы был предложен метод ОНД, который основан на законах спектрофотометрии и заключается в регистрации и анализе спектральных характеристик излучения, пропущенного, отраженного или поглощенного объектом [5]. Данные о составе крови являются входными для проведения настоящих исследований. Кроме того, к ним относится и информация о принципах построения приборов неинвазивной спектрофотометрии.

Для определения уровня техники и исследования существующих конструкций приборов были проведены информационно-патентные исследования и аналитический обзор, результаты которого позволили выявить, что разработок в данной области по всему миру ведется много, причем достаточно давно, что говорит об актуальности тематики. Важно отметить, что приборы и системы, определяющие концентрацию крови оптическим методом, исследуют спектральные характеристики биологического объекта, например фаланги пальца или мочки уха, причем конструктивные решения зависят от того, какой именно объект исследуется, а принцип действия остается неизменным. Для дальнейшего исследования была выбрана система для неинвазивного контроля уровня глюкозы в крови оптическим методом, в которой регистрируют и анализируют спектральную характеристику прошедшего через биологический объект излучения и связанную с ней оптическую плотность.

В процессе предварительных экспериментальных исследований были измерены коэффициенты пропускания мочки уха, фаланги пальца, водного раствора глюкозы и воды, анализ которых позволил сделать некоторые выводы:

- биологические объекты сильно поглощают излучение, что необходимо учитывать при создании макета ОЭС НКГ на этапе габаритно-энергетического расчета;
- в качестве объекта исследования предпочтительно выбрать мочку уха, так как ее коэффициент пропускания больше, чем у фаланги пальца;
- необходимо создать оптическую систему для эффективного ввода излучения в волоконно-оптический кабель (ВОК) и клипсу для фиксации ВОК относительно друг друга и объекта исследования;
- необходимо выявить пересечение спектральных характеристик глюкозы с другими компонентами крови, а также теоретически и практически исследовать спектральную характеристику глюкозы более детально.

Разработка макета ОЭС НКГ

На первом этапе создания макета ОЭС НКГ была разработана его структурная схема (рис. 2). Система действует следующим образом: луч от источника излучения (ИИ), работающего от источника питания (ИП), через оптическую систему (ОС) с помощью ВОК направлен на биологический объект, в данном случае мочку уха, закрепленный в клипсе (К). Прошедшее через ткань излучение по ВОК попадает в спектрометр (С), а затем в блок обработки информации (БОИ).

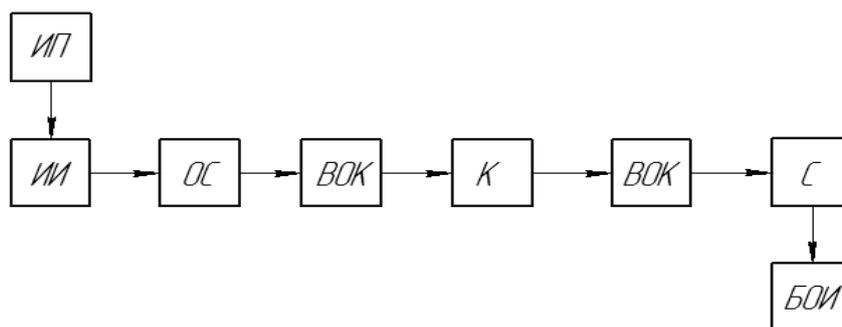


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Далее были разработаны необходимые элементы: клипса (рис. 3), представляющая собой две упруго соединенные между собой с помощью пружины и стержня лапки, и ОС на основе телеобъектива с выходным зрачком $D'=0,6$ мм и задним апертурным углом $2\omega'=4^\circ$, состоящая из четырех линз, зафиксированных в оправе насыпным методом.

а

б



Рис. 3. Элементы макета: а – клипса, б – оптическая система

Стоит отметить, что для первого макета был выбран источник излучения с широким спектральным составом – кварцевая лампа накаливания. После нахождения той узкой области спектра, в которой можно контролировать концентрацию сахара, планируется упростить систему: вместо источника с широким спектральным составом использовать светодиодные источники нужных длин волн, а в качестве приемника использовать не спектрометр, а фотодиод. В качестве приемника оптического излучения (ПОИ) выбран спектрометр USB4000 фирмы OceanOptics, а результат проведенного габаритно-энергетического расчета выявил достаточность яркости источника при выбранных габаритах ОС [6].

Также была разработана методика проведения дальнейших экспериментальных исследований, целью которых является определение длин волн с максимальным изменением оптических характеристик. Для разработки метода вычисления концентрации глюкозы в крови по спектральным характеристикам необходимо исследование зависимости изменения коэффициента пропускания биологического объекта от времени в узких областях спектра и сопоставление с зависимостью уровня гликемии от времени, определенного инвазивным методом.

Экспериментальные исследования

После сборки клипсы и ОС были проведены экспериментальные исследования эффективности работы элементов макета ОЭС НКГ.

Для оценки потерь излучения при использовании клипсы сравнивали поток излучения Φ_2 в системе с клипсой с потоком излучения Φ_1 , прошедшим напрямую по ВОК от ИИ к С (рис. 2). Отношение $\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$ сохраняет свою величину на всем диапазоне видимого излучения и равно примерно 0,76, то есть 24 % излучения теряется в результате использования клипсы

разработанной конструкции. Можно сделать вывод о значительном, но удовлетворительном уровне потерь. Однако по возможности их желательно минимизировать.

Оценка эффективности сбора излучения в ВОК проводилась следующим образом. Был измерен поток излучения Φ_3 , дошедший от ИИ по ВОК до ПОИ. Затем измерен поток излучения Φ_4 , дошедший от ИИ через ОС до ПОИ. Анализ полученных данных показал неэффективность работы оптической системы, так как во всем диапазоне видимого излучения $\Phi_3 > \Phi_4$. Причинами этого явления может быть недостаточная точность изготовления деталей оправы, отсутствие возможности юстировки, неверный теоретический расчет ОС.

Ввиду отсутствия возможности проведения экспериментов с пациентом из-за неэффективной работы ОС, методика выявления длин волн, чувствительных к изменению концентрации глюкозы, была реализована на растворах. К 2 мл воды 12 раз добавляли по 2 мл раствора глюкозы и измеряли коэффициент пропускания получившегося раствора. На рис. 4 представлены распределения коэффициента пропускания раствора при разных концентрациях глюкозы и накопленное его изменение при увеличении концентрации глюкозы в растворе.

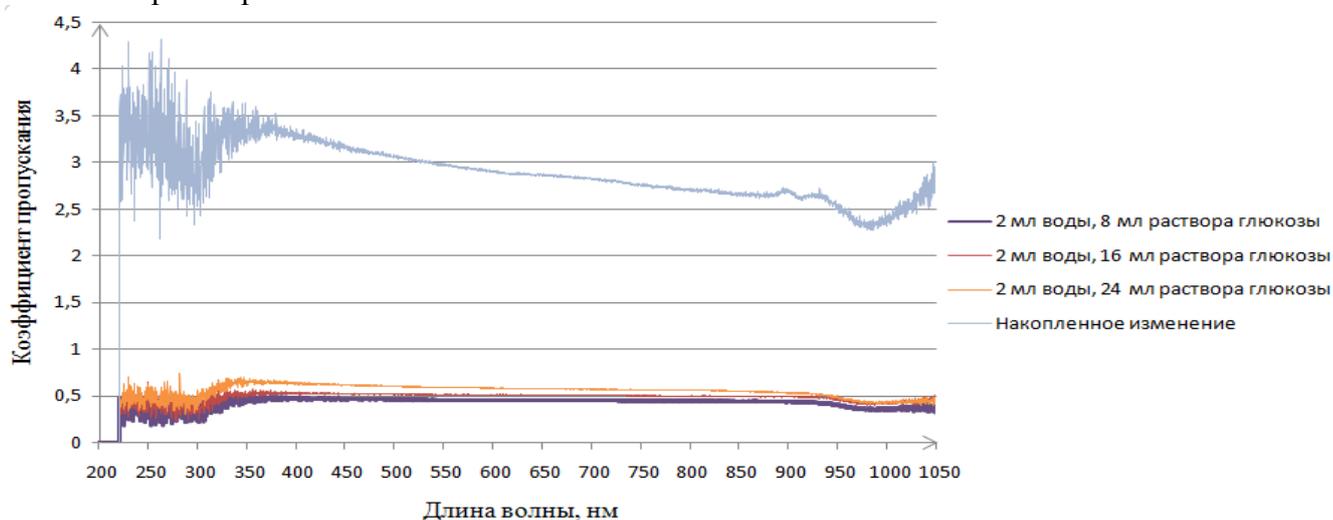


Рис. 4. Результаты измерения коэффициента пропускания раствора

Видны области спектра, на которых оптические характеристики раствора меняются в процессе эксперимента, то есть являются чувствительными к изменению концентрации глюкозы. Это области длин волн 850–950 нм.

Заключение

В работе применялись следующие методы исследования:

- элементы теории оптических систем [6];
- методы измерения спектральных характеристик объектов;
- методы качественного спектрального анализа биологических объектов [7].

Практическая значимость проекта заключается в том, что данная разработка в дальнейшем может быть использована для безболезненного контроля уровня глюкозы в крови больных сахарным диабетом, что подтвердил анализ полученных данных. Стоит отметить, что результаты работы могут быть использованы также для контроля таких компонентов крови, как холестерин, гемоглобин, билирубин, инсулин, токсины [8].

В дальнейшем планируется доработка макета; набор статистики для уточнения методики обработки результатов измерения; упрощение конструкции за счет замены элементов на более дешевые и компактные; оценка погрешности измерений и поиск решений для ее уменьшения; разработка единого корпуса прибора. Заключительным этапом должны стать клинические испытания.

Публикации

1. Ластовская Е.А. Критический обзор современных спектральных методов и приборов анализа, применяемых в медицине и фармацевтике // I Всероссийский конгресс молодых ученых 10–13 апреля 2012 года: Актуальные вопросы построения оптико-электронных систем. IV сессия научной школы «Оптико-электронное приборостроение». Сборник трудов молодых ученых. СПб., 2012. С. 101–105.
2. Ластовская Е.А. Неинвазивные глюкометры и проблемы их внедрения в медицинскую практику // Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных. Вып. 2. СПб., 2013. С. 116–117.
3. Ластовская Е.А. Проектирование оптико-электронной системы неинвазивного контроля уровня глюкозы в крови // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 239–242.
4. Ластовская Е.А. Разработка оптической системы для эффективного ввода излучения в оптическое волокно неинвазивного глюкометра // Сборник тезисов докладов конгресса молодых учёных. Вып. 2. СПб., 2014. С. 103–104.
5. Ластовская Е.А. Результаты проектирования оптико-электронной системы неинвазивного контроля глюкозы // «Мечниковские чтения-2014»: Материалы 87-й конференции студенческого научного общества. 22–23 апреля 2014 года. «Трансляционная медицина: от теории к практике»: Материалы 2-й научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Ч. I. СПб., 2014. С. 103–104.

Литература

1. Фадеев П.А. Сахарный диабет. М., 2009. – 208 с.
2. Рогаткин Д.А. Лазерная клиническая диагностика как одно из перспективных направлений биомедицинской радиоэлектроники // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 3. С. 34–41.
3. Елисеев А.А., Морозова Ю.П., Козинская В.А. Компьютерная спектрофотометрия в медицинской диагностике // Вестник Томского государственного университета. 2000. № 269. С. 113–117.
4. Бобонич П. Скорая помощь своими руками // Радиоаматор. 2009. № 10. С. 26–28.
5. Герасименко В.А. Современные методы определения глюкозы [Электронный ресурс] // Газета «Новости А/О Юнимед». 2009. 19 ноября. URL: <http://unimedao.ru/articles/6826/> (дата обращения: 20.11.2013).
6. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов: Учебное пособие. СПб., 2007. – 579 с.
7. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М., 2007. – 368 с.
8. Оптическая биомедицинская диагностика. В 2 т. / Под ред. В.В. Тучина. М., 2007. – 368 с.



Левин Михаил Константинович
Гуманитарный факультет
Кафедра прикладной экономики и маркетинга
E-mail: lmk230690@gmail.com

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

М.К. Левин

Научный руководитель – профессор О.В. Васюхин

Сегодня крайне остро стоит вопрос низкого уровня конкурентоспособности отечественных научных разработок, что обусловлено отсутствием внимания к этой теме и связано со сложностью механизма их анализа и оценки. Количество, качество научно-технической продукции и ее конкурентоспособность напрямую не зависят ни от объема инвестиций в науку, ни от времени и трудозатрат, необходимых на ее создание. Оценка уровня конкурентоспособности научно-технической продукции – сложный, но важный и необходимый этап в деятельности любого предприятия, так как ее повышение напрямую связано с повышением уровня конкурентоспособности всего предприятия.

Проблемы анализа понятия «конкурентоспособность» не новы. Общие теоретические вопросы в области изучения конкуренции, конкурентоспособности и менеджмента получили отражение в работах зарубежных и отечественных ученых-экономистов: М.Э. Портера, А.А. Томпсона, А.Е. Карлика, Х.А. Фасхиева, А.Н. Петрова, Ю.М. Неруша, О.В. Васюхина, В.И. Степанова, Н.К. Моисеевой и Т.Р. Адриановой, Ф. Котлера, Е.Н. Голубкова, Д.Дж. Бауэрсокса, Г.Л. Багиева, Я. Деккера, П. Дойля, Б.Г. Мазмановой и других.

Вместе с тем, несмотря на большое количество исследований и публикаций, относящихся к решению проблемы управления конкурентоспособностью объектов и систем, практически отсутствуют методологические и методические рекомендации применительно к оценке уровня конкурентоспособности в сфере научно-технической продукции. Поэтому тема настоящего исследования является весьма актуальной и своевременной.

Цель работы – анализ методологических подходов и методических основ анализа и оценки конкурентоспособности научно-технической продукции на примере систем спектральной оптической когерентной микроскопии (СОКМ). Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- проанализирован рынок приборов СОКМ;
- исследованы критерии и факторы конкурентоспособности научно-технической продукции;
- проанализированы существующие методики анализа и оценки уровня конкурентоспособности научно-технической продукции;
- исследованы проблемы ценообразования научно-технической продукции;
- выполнен сравнительный анализ методов ценообразования;
- разработан методологический подход к ценообразованию научно-технической продукции;
- произведен расчет цены опытного образца прибора СОКМ;
- разработаны методологические основы анализа и оценки конкурентоспособности научно-технической продукции;
- произведен расчет уровня конкурентоспособности опытного образца прибора СОКМ.

– даны рекомендации по повышению уровня конкурентоспособности научно-технической продукции в Российской Федерации.

Предметами настоящего исследования являются методология и методика анализа и оценки уровня конкурентоспособности различных объектов и систем.

Объект исследования – инновационная разработка в сфере СОКМ (опытный образец прибора).

Рассмотрены особенности научно-технической продукции, ее классификация, а также источники информации (их оценка и рекомендации), необходимые для анализа рынка научно-технической продукции. Приведены основные термины и положения СОКМ. Выполнен анализ рынка научно-технической продукции на основе вторичной информации и на основе полевых исследований на примере рынка систем СОКМ. Обоснованы наиболее приоритетные направления для входа на рынок с инновационным прибором – объектом исследования. Дан прогноз потребности рынка в инновационной разработке.

Рассмотрена роль конкуренции в современной экономике. Даны определения конкуренции и конкурентоспособности. Проанализированы формы и виды конкуренции применительно к различным типам рынков. Рассмотрена конкурентоспособность товара (продукции), а также методы оценки конкурентных преимуществ и методологические основы анализа и оценки уровня конкурентоспособности различных экономических объектов. Выявлены и приведены особенности анализа и оценки уровня конкурентоспособности научно-технической продукции.

Раскрыт процесс ценообразования научно-технической продукции. Рассмотрены различные его методики и проведен сравнительный анализ методов ценообразования. Приведены этапы формирования цены и факторы, влияющие на ее уровень. Предложена классификация ценообразующих факторов. Обоснованы теоретические подходы к расчету цены научно-технической продукции. Проанализирована взаимосвязь между ценой и конкурентоспособностью объекта. Выбран метод расчета цены, наиболее применимый к системам СОКМ.

Выбрана группа методов, необходимых для оценки уровня конкурентоспособности научно-технической продукции и проведен его расчет на конкретном примере. Даны рекомендации и направления по повышению уровня конкурентоспособности научно-технической продукции в России.

Публикации

1. Левин М.К., Васюхин О.В., Цуканова О.А. Проблемы анализа рынка научно-технической продукции // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 1–6.
2. Левин М.К., Васюхин О.В., Цуканова О.А. Развитие когерентной томографии // Труды гуманитарного факультета: Сборник научных статей. СПб., 2013. С. 26-27.
3. Левин М.К., Васюхин О.В., Цуканова О.А. Анализ рынка оптической когерентной томографии на основе вторичной информации // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2013. С. 83.
4. Левин М.К., Васюхин О.В. Подходы и методы ценообразования научно-технической продукции // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 345–347.
5. Левин М.К., Васюхин О.В. Сравнительный анализ методов ценообразования инновационной продукции // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С.1–4.
6. Левин М.К., Васюхин О.В. Проблемы ценообразования научно-технической продукции // 68-я региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна – 2014»: Сборник научных статей. СПб., 2014. С. 1–3.
7. Левин М.К., Васюхин О.В. Сравнительный анализ подходов к ценообразованию научно-технической продукции // Труды гуманитарного факультета: Сборник научных статей. СПб., 2014. С. 48–51.

Литература

1. Васюхин О.В., Левин М.К., Цуканова О.А. Проблемы анализа рынка научно-технической продукции // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 1–6.
2. Васюхин О.В., Левин М.К. Сравнительный анализ методов ценообразования инновационной продукции // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С.1–4.
3. Котлер Ф., Армстронг Г. Основы маркетинга. М., СПб., Киев, 2003. – 352 с.
4. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент: Анализ, планирование, внедрение, контроль. СПб., 1999. – 896 с.
5. Костин И.М., Фасхиев Х.А. Измерение конкурентоспособности предприятий // Менеджмент организации XXI века: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. Наб. Челны, 2001. С. 115–117.
6. Кротков А.М., Еленева Ю.Я. Конкурентоспособность предприятия: подходы к обеспечению, критерии, методы оценки // Маркетинг в России и за рубежом. 2001. № 6. С. 59–68.
7. Кутин А.А., Ползунова Н.Н. Модель взаимосвязи конкурентоспособности станкостроительной продукции и методов управления предприятием // Вестник машиностроения. 1999. № 2. С. 41–44.



Левина Маргарита Игоревна
Гуманитарный факультет
Кафедра прикладной экономики и маркетинга
E-mail: rita-pony@mail.ru

МЕТОДИКИ И ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ РИСКАМИ

М.И. Левина

Научный руководитель – доцент В.Ю. Петров

С развитием интернет-технологий и электронной коммерции с каждым днем появляется все больше угроз безопасности информации. Сегодня организации все чаще используют информацию в бизнес-процессах для облегчения управленческих решений и ведения бизнеса. Зависимость от информации в бизнес-среде, где множество торговых операций осуществляется в электронном виде через интернет, крайне велика. Она привела к существенному увеличению влияния уровня безопасности информационных систем на успех, а иногда и просто на возможность ведения бизнеса. Поэтому безопасность информационных систем является одним из важнейших вопросов, который привлекает внимание аналитиков, инженеров и других специалистов в области информационной безопасности, что говорит об актуальности данной темы.

В настоящее время управление информационными рисками представляет собой одно из наиболее актуальных и динамично развивающихся направлений стратегического и оперативного менеджмента в области защиты информации. Его основная задача – объективно идентифицировать и оценить наиболее значимые для бизнеса информационные риски компании, а также адекватность используемых средств контроля рисков для увеличения эффективности и рентабельности ее экономической деятельности.

Пока еще не создана концепция управления информационными рисками, в которой бы с системных позиций рассматривались все составляющие качества и безопасности информации, влияющие на эффективность ее использования в бизнес-процессах.

Существующие методы и средства анализа информационных рисков не объединены в рамках единой методологии и могут применяться, как правило, только для исследования отдельных вопросов безопасности и качества информации. Не уделяется должного внимания использованию методов мягких вычислений для решения проблем анализа и синтеза систем управления информационными рисками.

Цель исследования заключается в разработке методологического подхода к анализу и оценке информационных рисков при внедрении информационных систем.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- даны определения основных понятий информационных рисков, целей и задач информационного риск-менеджмента, обоснована его структура;
- проанализирована взаимосвязь информационных и экономических рисков;
- сформулированы цели, задачи и стратегии управления информационными рисками, сформированы методологические принципы анализа и создания систем управления информационными рисками;
- приведены классификация и характеристика механизмов управления информационными рисками предприятия;
- разработаны методы и модели выбора механизмов управления информационными рисками и подсистем информационной системы;
- выполнена структуризация расходов и определены полные расходы предприятия на управление информационными рисками.

Объектом исследования является процесс управления информационными рисками.

Предмет исследования – методы и модели управления.

Рассмотрены такие понятия как информационные системы и информационный риск. Проанализированы пути воздействия информационных рисков на процесс функционирования предприятия, проанализированы существующие классификации угроз информационной безопасности, которые разделяются по виду и характеру воздействия, источникам и объектам угроз. Выделены стандарты и нормативные документы, существующие в области управления и оценки рисков информационной безопасности. Определены основные задачи оценки и управления информационными рисками.

Рассмотрены методы анализа и оценки информационных рисков. Выполнен качественный и количественный их анализ. Выявлены основные этапы процесса оценки информационных рисков (определение характеристик информационной системы; идентификация уязвимостей и угроз; анализ контроля безопасности; определение вероятностей; анализ воздействий; определение рисков; рекомендуемые контрмеры; оформление итоговых документов).

В работе рассмотрены разнообразные подходы к управлению информационными рисками. Произведен выбор инструментальных средств, таких как OCTAVE, CRAMM, COBRA. Проанализированы недостатки и ограничения программных продуктов.

Далее проанализированы расходы, затрачиваемые на управление информационными рисками. Рассмотрены финансовые методы управления информационными рисками предприятий.

Данная работа направлена на исследование нового подхода к понятию «информационный риск», суть которого сводится к пониманию и управлению информационными рисками при внедрении информационных систем.

В ходе исследования сформированы концептуальные основы информационного риск-менеджмента, методология управления информационными рисками, а также определены понятийный аппарат, цели, задачи и основные принципы управления. Выполнен обзор

международных стандартов, продемонстрирована эволюция представлений о риске, его влияние на современное российское общество.

Проведен качественный и количественный анализ, а также структурированная оценка информационных рисков. В работе детально рассмотрены одни из самых распространенных и широко используемых методик управления информационными рисками: CRAMM, COBRA, OCTAVE. Они позволяют оценить существующий уровень остаточных информационных рисков в отечественных компаниях, что особенно важно в тех случаях, когда к информационной системе предъявляются повышенные требования в области защиты информации и непрерывности бизнеса. Инструментальные средства анализа рисков, основанные на современных базах знаний и процедурах логического вывода, позволяют строить модели угроз и модели рисков, связанных с отдельными информационными и бизнестранзакциями. а также выявлять такие информационные активы компании, риск нарушения защищенности которых является критическим, то есть неприемлемым. Такие инструментальные средства дают возможность вести мониторинг выполнения требований по организации режима информационной безопасности отечественной компании.

Публикации

1. *Петров В.Ю., Левина М.И.* Анализ рисков при внедрении информационных систем // Труды гуманитарного факультета: Сборник научных статей. СПб., 2013. С. 102–106.
2. *Петров В.Ю., Левина М.И.* Оценка и управление рисками информационных систем // Труды гуманитарного факультета: Сборник научных статей. СПб., 2014. С. 99-100.
3. *Левина М.И., Петров В.Ю.* Управление информационными рисками при внедрении информационных систем // Международный студенческий научный вестник. 2014. № 2. С. 55-56.
4. *Левина М.И.* Оценка и управление рисками информационных систем // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 3. СПб., 2014. С. 184.

Литература

1. *Астахов А.М.* Искусство управления информационными рисками. М., 2010. – 312 с.
2. *Завгородний В.И.* Информационные риски: сущность, концепция управления. М., 2009. – 177 с.
3. *Нестеров С.А., Петренко С.А.* Программные средства анализа информационных рисков компании // Экспресс-электроника. 2007. № 10. С. 84–86.
4. *Петренко С.А., Курбатов В.А.* Политики информационной безопасности. М., 2008.– 400 с.
5. *Тихонов В.А., Райх В.В.* Информационная безопасность: концептуальные, правовые, организационные и технические аспекты: Учебное пособие. М., 2006. – 528 с.



Лосенков Андрей Андреевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: alosenkov@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ С ПРИЛОЖЕНИЕМ К СИСТЕМАМ МОБИЛЬНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ГИДРОПРИВОДА

А.А. Лосенков

Научный руководитель – старший научный сотрудник С.В. Арановский

Теория автоматического управления (ТАУ) – наука об управлении, изучающая задачи анализа и синтеза систем автоматического управления. Она имеет огромное прикладное значение в современном обществе: все больше и больше объектов окружающего мира становятся автоматизированными и автономными. Не являются исключением и тяжелые машины, помогающие человеку в таких отраслях промышленности, как строительство, дорожное хозяйство, лесозаготовки, добыча полезных ископаемых и пр. Несомненно, двигатели, приводящие силовое оборудование таких машин в движение, должны иметь высокую мощность, однако с ростом мощности растет также и масса привода. Среди разновидностей приводных устройств можно выделить гидравлический, имеющий высокую удельную мощность (развиваемую на единицу массы). Помимо этого, к числу его достоинств можно отнести тот факт, что гидропривод способен долго удерживать груз на весу без затрат внешней энергии в силу особенностей конструкции. Еще одно достоинство гидропривода – возможность использования его рабочей жидкости и в трансмиссии машины, что упрощает конструкцию последней. Достоинствами гидропривода объясняется его использование в тяжелых машинах, применяемых в перечисленных выше областях. Оборудованные им машины называются гидрофицированными.

ТАУ включает в себя теорию линейных систем, которая хорошо изучена. В то же время математические модели, описывающие поведение и характер взаимодействия большинства объектов реального мира, представляются нелинейными уравнениями, поэтому применение методов линейной ТАУ ограничено. Теория нелинейных систем изучена не столь глубоко, и решения задач управления некоторыми привычными для человека объектами, к числу которых может быть отнесен и гидравлический привод, зачастую оказываются сложными. Безусловно, многие процессы в определенных пределах и с допустимой точностью могут быть представлены линейными системами. Существуют модели гидравлического привода [1–4], в которых управляющий орган – гидрораспределитель и динамика давлений в полостях гидроцилиндра описывается линейными уравнениями, однако на практике подобные модели могут быть применимы в лучшем случае для моделирования и управления лабораторными установками. Например, в линейной модели гидрораспределителя (как правило, в рассматриваемом классе используются золотниковые гидрораспределители) полагается, что площадь открытия рабочего окна гидроцилиндра прямо пропорциональна смещению золотника относительно нейтрального (исходного, нулевого) положения (или пропорциональна управляющему сигналу, если пренебречь динамикой золотника). На практике же это справедливо только для гидрораспределителей с так называемым точным центром (*open center spool*) [5], в которых небольшое смещение золотника уже приводит к открытию рабочего окна и, как следствие, к движению гидропривода. Так как на практике преобладает ручное управление гидроприводом при помощи джойстиков, использование таких гидрораспределителей в промышленности приводит к тому, что любое случайное

касание джойстика может стать причиной произвольного перемещения гидропривода. В промышленности же золотник проектируют таким образом, чтобы он перекрывал рабочее окно с запасом – так называемые гидрораспределители с закрытым центром (*closed center spool*). Схема такого гидропривода представлена на рис. 1, однако их математические модели становятся нелинейными вследствие появления мертвой зоны: при небольшом смещении золотника рабочее окно не открывается.

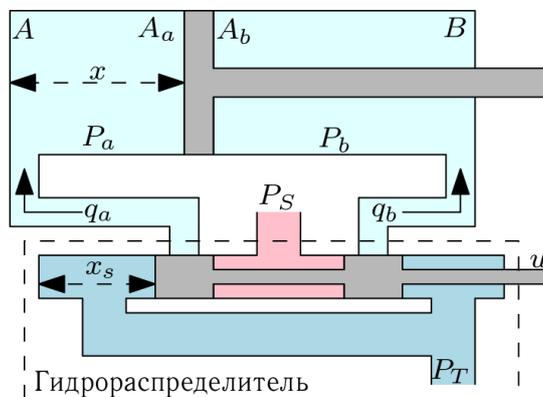


Рис. 1. Схема гидравлического привода: A и B – камеры гидроцилиндра; P_a, P_b – давления в камерах; P_s – давление насоса; P_T – давление в резервуаре; A_a, A_b – площади гидроцилиндра со стороны соответствующих камер; q_a, q_b – потоки рабочей жидкости между гидрораспределителем и соответствующими камерами гидроцилиндра, $0 \leq x \leq x_{\max}$ – положение штока гидроцилиндра; u – входной сигнал управления; x_s – смещение золотника

Помимо мертвых зон, модели гидрораспределителя должны учитывать насыщение – нелинейность, обусловленную тем, что при больших смещениях золотника относительно нейтрального положения, когда рабочее окно открылось полностью, увеличение сигнала управления не приводит к увеличению потока рабочей жидкости в гидроцилиндр. Это явление также не описывается линейными моделями.

На практике оказывается, что большая часть элементов, образующих систему гидропривода, описывается нелинейными уравнениями. Ввиду сложности синтеза законов управления для известных нелинейных моделей гидропривода уровень автоматизации гидрофицированных машин невысок, однако решение этой задачи является актуальным для промышленности. Автоматизация гидропривода позволила бы повысить эффективность работы таких машин и уменьшить время, необходимое для подготовки квалифицированного оператора (сейчас на это уходит до двух лет).

Помимо существенных нелинейностей моделей элементов гидропривода, построение моделей последнего, применимых в промышленности, осложнено также наличием большого числа вспомогательных устройств, таких как защитные клапаны, контуры регулирования давления и чувствительности к нагрузке и пр. Некоторые из этих устройств практически не влияют на поведение системы в нормальном эксплуатационном режиме (вступая в действие при аварийных ситуациях), но такие устройства, как компенсаторы давления, значительно усложняют систему (гидравлические схемы гидрораспределителя с компенсатором давления и без приведены на рис. 2) и оказывают значительное влияние на протекающие в гидроприводе процессы. Известные нелинейные модели гидропривода [6–10] не учитывают эффекты от работы упомянутых устройств.

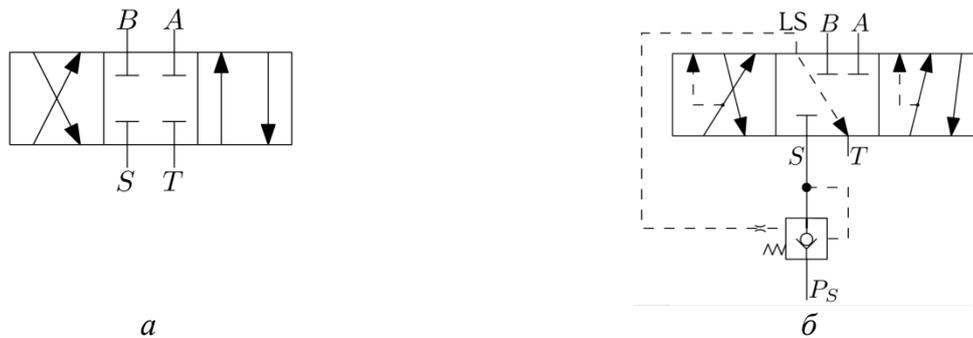


Рис. 2. Гидравлическая схема золотникового гидрораспределителя: а – без компенсатора давления: А, В, S и T – гидролинии камер гидроцилиндра, насоса и резервуара соответственно; б – с компенсатором давления: LS – гидролиния, передающая сигнал с нагруженного порта (того порта, который подключен в гидролинии насоса S) к компенсатору давления

Резюмируя сказанное, можно отметить, что в большинстве статей по управлению гидравлическим приводом используются линейные модели гидрораспределителя с точным центром без учета нелинейностей и наличия дополнительных элементов, присущих промышленным гидросистемам. Для точного управления промышленными гидравлическими системами требуются более сложные модели, включающие в себя гидрораспределители с закрытым центром, нелинейную динамику давлений, а также учитывающие дополнительные устройства в его системе. Более того, в большинстве работ полагается, что измерению доступен широкий спектр сигналов, включая измерения давления, положения штока гидроцилиндра, его скорость, как в [11], и даже ускорение, как в [12]. В промышленных системах зачастую невозможно измерить все эти сигналы. Иногда измерению доступно лишь положение штока гидроцилиндра, а остальные сигналы оцениваются при помощи наблюдателей, как в [13] и [14].

Целью настоящего исследования являлась разработка математической модели гидравлического привода, включающей в себя нелинейные модели гидроцилиндра и гидрораспределителя и учитывающей наличие характерных для промышленных гидроприводов вспомогательных устройств, которые оказывают влияние на поведение системы, а также формирование нелинейного следящего закона управления, требующего лишь информации о положении штока гидроцилиндра. Экспериментальные исследования были проведены на гидрофицированном робототехническом кране-манипуляторе, представляющем собой немного уменьшенную копию крана, применяемого в лесозаготовительной промышленности. Исследуемое звено крана представлено на рис. 3Рис. .



Рис. 3. Управляемое звено исследуемого крана-манипулятора: X – линейная координата, описывающая степень выдвижения звена; θ – угловая координата звена, связанная геометрически с линейной

В ходе исследовательской работы были решены поставленные задачи.

- Разработана новая математическая модель гидропривода, отличающаяся от большинства известных моделей учетом нелинейной зависимости площади открытия рабочего окна гидрораспределителя с закрытым центром от величины смещения его золотника и характерного для промышленных гидроприводов вспомогательного устройства – компенсатора давления.

- На основе анализа новой модели разработан закон управления, включающий в себя введение прямой связи по скорости и требующий лишь информации о положении гидроцилиндра.

- Разработанные математическая модель и закон управления апробированы в ходе экспериментальных исследований в реальном времени на лабораторном прототипе робототехнического крана-манипулятора, применяемого в лесозаготовительной промышленности. Результаты экспериментов показали, что использование предложенного метода управления позволяет обеспечить хорошее качество слежения за типовыми задающими сигналами.

Публикации

1. *Лосенков А.А., Никифорова Л.В., Гриценко П.А.* Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя крана-манипулятора лесозаготовительной машины // Альманах научных работ молодых ученых. СПб., 2013. С. 207–209.
2. *Арановский С.В., Лосенков А.А., Никифорова Л.В., Фрейдович Л.Б.* Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя. Часть I. Моделирование // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 52–56.
3. *Арановский С.В., Лосенков А.А., Никифорова Л.В., Фрейдович Л.Б.* Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя. Часть II. Идентификация // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 4. С. 57–60.
4. *Лосенков А.А., Никифорова Л.В., Арановский С.В.* Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2013. С. 175–176.
5. *Арановский С.В., Лосенков А.А.* Система управления гидроприводом с компенсацией статической нелинейности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 5 (87). С. 77–81.
6. *Лосенков А.А.* Моделирование и идентификация процессов в гидравлических системах // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров НИУ ИТМО. СПб., 2013. С. 17–21.
7. *Лосенков А.А.* Моделирование и идентификация нелинейных систем с приложением к системам гидропривода // XVIII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов. СПб., 2013. С. 150.
8. *Лосенков А.А.* Управление положением индустриального гидропривода с компенсатором давления // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 283–284.
9. *Лосенков А.А.* Управление положением индустриального гидропривода с компенсатором давления // Сборник трудов III Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2014. С. 91–96.
10. *Aranovskiy S., Losenkov A., Vasquez C.* Position control of an industrial hydraulic system with a pressure compensator // 2014 22nd Mediterranean Conference of Control and Automation (MED). 2014. P. 1329–1334.

Литература

1. *Loukianov A.G., Teraoka Y.M., Orlov Y.V.* Chaotic trajectory tracking for an electro-hydraulic actuator // *Analysis and Control of Chaotic Systems*. 2006. Vol. 1. No 1. P. 65–70.

2. Yanada H., Furuta K. Adaptive control of an electrohydraulic servo system utilizing online estimate of its natural frequency // *Mechatronics*. 2007. Vol. 17. No 6. P. 337–343.
3. Andersen T.O., Hansen M.R., Pedersen H.C., Conrad F. Comparison of linear controllers for a hydraulic servo system // *Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power*. 2005. P. 449–454.
4. Kim W., Won D., Shin D., Chung C.C. Output feedback nonlinear control for electro-hydraulic systems // *Mechatronics*. 2012. Vol. 22. No 6. P. 766 – 777.
5. Merritt H.E. Hydraulic control systems. 1967. – 360 p.
6. Ferreira J.A., Almeida F.G., Quintas M.R. Hybrid models for hardware-in-the-loop simulation of hydraulic systems. Part I: Theory // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2004. Vol. 218. No 6. P. 465–474.
7. Pohl J., Sethson M., Krus P., Palmberg J.-O. Modelling and validation of a fast switching valve intended for combustion engine valve trains // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2002. Vol. 216. No 2. P. 105–116.
8. Aranovskiy S. Modeling and identification of spool dynamics in an industrial electro-hydraulic valve // *2013 21st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2013. P. 82–87.
9. Papadopoulos E., Mu B., Frenette R. On modeling, identification, and control of a heavy-duty electrohydraulic harvester manipulator // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2003. Vol. 8. No 2. P. 178–187.
10. Арановский С.В., Лосенков А.А., Никифорова Л.В., Фрейдович Л.Б. Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя. Часть I. Моделирование // *Известия вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 4. С. 52–56.
11. Sohl G.A., Bobrow J.E. Experiments and simulations on the nonlinear control of a hydraulic servosystem // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 1999. Vol. 7. No 2. P. 238–247.
12. Guan C., Pan S. Adaptive sliding mode control of electro-hydraulic system with nonlinear unknown parameters // *Control Engineering Practice*. 2008. Vol. 16. No 11. P. 1275–1284.
13. Kilic E., Çalişkan H., Balkan T. et al. Accurate pressure prediction of a servo-valve controlled hydraulic system // *Mechatronics*. 2012. Vol. 22. No 7. P. 997–1014.
14. DeBoer C.C., Yao B. Velocity control of hydraulic cylinders with only pressure feedback // *Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'01)*. 2001. P. DSC-2B-3.



Лялюшкин Леонид Сергеевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра фотоники и оптоинформатики
E-mail: l.lyalyushkin@phoi.ifmo.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОРОЖДЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ПОНЯТИЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ

Л.С. Лялюшкин

Научный руководитель – старший научный сотрудник А.В. Павлов

Цель работы – исследовать влияние характеристик реальных голографических регистрирующих сред на характеристики индуктивно порождаемых понятий методом численного моделирования.

В работе использована модель 4-*f* схемы голографии Фурье (рис. 1а) с обращением волнового фронта в плоскости корреляций, предложенная в работе [1].

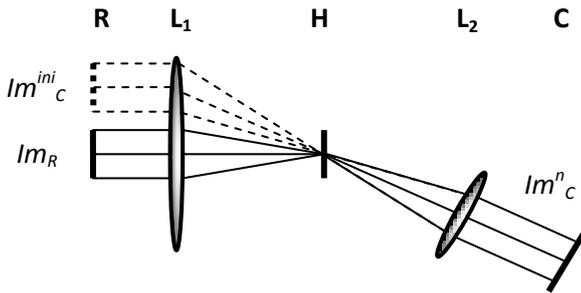


Рис. 1а. Схема голографии Фурье при реализации индуктивного вывода: R и C – плоскости входная и корреляций, H – голограмма Фурье, L – фурье-преобразующие линзы, Im_R^i и Im_c^n – образы объектный и опорный соответственно

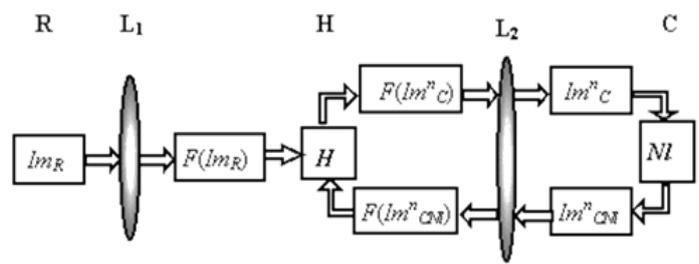


Рис. 1б. Схема рис. 1а как кольцевая система с нелинейным звеном NI – фазоспрягающим зеркалом и двумя диссипативными элементами – голограммой Фурье H и NI

Реализация индуктивного вывода методом голографии Фурье в работе [1] основана на использовании шкалы частот в пространстве Фурье как шкалы общности признаков и расширении спектра опорного образа за счет нелинейного обращения волнового фронта. Образы – опорный и объектный – представляются изображениями. Обобщение, как расширение спектра опорного образа в область низких частот, достигается в ходе итерационной процедуры с перезаписью голограммы Фурье на каждой итерации. Для этого схема голографии Фурье помещается в резонатор, образованный фазоспрягающим зеркалом (ФЗС) в плоскости корреляций (рис. 1а). Такая схема может быть рассмотрена как кольцевая система с двумя диссипативными звеньями – голограммой Фурье и ФЗС (рис. 1б).

В настоящей работе исследовано влияние экспозиционных характеристик моделей реальных голографических сред (ГРС) на динамику процесса индуктивного вывода и характеристики порождаемого устойчивого образа.

Влияние экспозиционных характеристик ГРС обусловлено тем, что спектры образов Im_R и Im_C обладают перепадом амплитуд в несколько порядков. В результате ограниченности динамического диапазона ГРС H записывается в ограниченном частотном диапазоне, в связи с чем возникает дополнительная фильтрация.

Влияние экспозиционных характеристик ГРС исследовано численно. Используются два подхода к их моделированию:

– непосредственное задание экспозиционных характеристик ГРС как зависимости дифракционной эффективности от экспозиции $\eta(E)$. Используются следующие модели:

$$\eta(E) = \frac{1}{1 + \exp(a - 2aE)}, \quad (1)$$

$$\eta(E) = \exp\left(-\frac{(E - a)^2}{b}\right); \quad (2)$$

– задание характеристик голограммы как зависимости локальной дифракционной эффективности от пространственной частоты $\eta(\nu)$, описываемых моделями:

$$\eta(\nu) = \frac{1}{1 + \exp(a - b\nu)}, \quad (3)$$

$$\eta(\nu) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\nu - b)^2}{c}\right), \quad (4)$$

$$\eta(v) = \frac{a}{\sqrt{b + cv^2}}, \quad (5)$$

где a , b и c – параметры. Модель (3) описывает высокочастотный фильтр, (4) – полосовой и (5) – низкочастотный.

В работах [1–3] показано, что система сходится к устойчивому циклическому режиму, в плоскости S формируется образ, характеризующийся наличием ярко выраженного глобального максимума (ГМ). Взаимодействие двух конкурирующих механизмов – дифракции на голограмме H и нелинейного итерированного отображения (НИО) на фазосопрягающем зеркале – обуславливает циклический характер изменения ширины ГМ до и после отображения на НИО. Поэтому в качестве оценки устойчивого режима принята следующая:

$$\Delta_{Norm} = \frac{2(d_C - d_{CNI})}{d_C + d_{CNI}}, \quad (6)$$

где d_C и d_{CNI} – диаметры ГМ по уровню 0,5 до и после НИО. Оценка НИО:

$$\Delta_r = NI^{-1}(0.5) - 0.5, \quad (7)$$

где NI^{-1} – функция, обратная НИО.

На рис. 2 даны рассчитанные зависимости (точки) и аппроксимирующие кривые оценки (6) от (7) для трех моделей ГРС, на рис. 3 – для моделей фильтров (3–5).

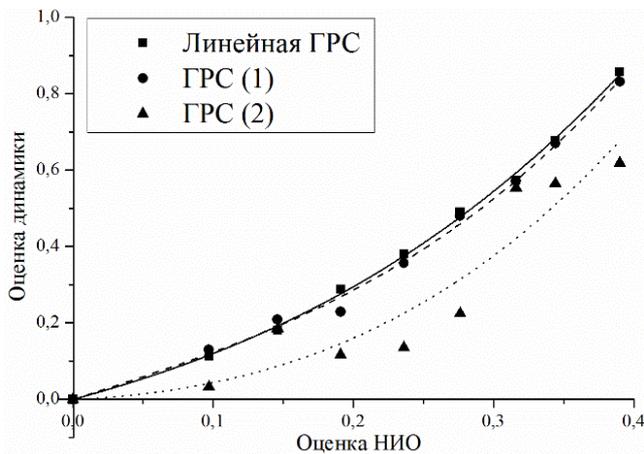


Рис. 2. Зависимости оценки динамики от оценки НИО при разных моделях ГРС

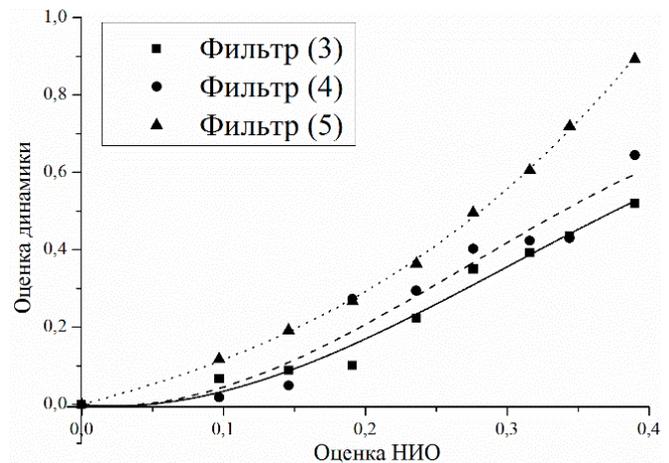


Рис. 3. Зависимости оценки динамики от оценки НИО при разных фильтрах

Из анализа графиков на рис. 2 видно, что в случае модели ГРС с наличием инверсного участка зависимости дифракционной эффективности от экспозиции (2), характерной для ряда ГРС, например жидкокристаллических структур [6], наблюдается существенное отличие оценки устойчивого режима от оценок для моделей ГРС: линейной и с насыщением на участке переэкспозиции (1). Этот эффект обусловлен тем, что наличие инверсного участка зависимости $\eta(E)$ ведет к сужению записываемой на голограмме полосы со стороны низких частот. В результате при низкой степени нелинейности НИО расширение спектра, достигаемое на каждой итерации, оказывается недостаточным для его эффективной записи. Инверсный участок экспозиционной характеристики в области переэкспозиции нивелирует эффект расширения спектра за счет НИО, и процесс, рассматриваемый в плоскости голограммы H , стабилизируется на достаточно узкополосной голограмме. В ряде случаев полоса частот голограммы не достигала даже нулевой частоты. При узкой спектральной полосе исходного опорного образа и низкой степени нелинейности НИО наблюдался эффект недостаточности НИО и экспозиционных характеристик ГРС для регистрации низкочастотных компонент (разностных частот), и расширение спектра происходило только в высокочастотную область.

Анализируя графики, представленные на рис. 3, можно видеть, что наблюдается некоторое отличие оценок динамики системы в устойчивом режиме при низкочастотной фильтрации (5) от оценок для высокочастотной (3) и полосовой (4) фильтраций. Это связано с тем, что отображение на перезаписываемой голограмме Фурье ведет к росту d_C , то есть увеличению доли низких частот в спектре образа в плоскости C . Дополнительная низкочастотная фильтрация на голограмме, таким образом, усиливает действие дифракции на ней в смысле роста d_C и тем самым оценки (6).

Заключение

Схема голографии Фурье с обращением волнового фронта в рамках решения задачи формирования индуктивного понятия методом расширения спектра опорного образа в область низких пространственных частот за счет нелинейного обращения волнового фронта в корреляционной плоскости может рассматриваться как открытая диссипативная система. На характеристики формируемого понятия оказывают влияние два реальных физических механизма:

- нелинейное обращение волнового фронта в слое корреляции (отображение на НИО) отвечает за выработку понятия;

- дифракция на голограмме в использованной системе рассматривается как диссипативный фактор, отвечающий за выработку необходимого понятия.

Эти механизмы оказывают противоположное действие:

- НИО обеспечивает абстрагирование от частных признаков, сопровождающееся разрушением внутренней корреляции;

- дифракция на голограмме обеспечивает восстановление ВК.

При формировании понятия ГМ образа в качестве оценки, в том числе аттрактора системы, принято значение его полуширины d_C .

Рост отношения величины d_C/d_R (где d_R – диаметр ГМ функции автокорреляции) может трактоваться как усиление противодействия двух механизмов: НИО и дифракции на голограмме. Максимальная степень адекватности при соотнесении с объектным образом соответствует $d_C/d_R = 1$.

Введенные оценки динамики и НИО аппроксимируются полиномом третьей степени для ансамбля реализаций при ряде значений НИО. Используемые характеристики ГРС, соответствующие реальным, выполняют функцию дополнительной фильтрации: ограничение частотного диапазона голограммы.

Используемые модели ГРС наглядно показывают их влияние на процесс: в случае с ГРС, характерной жидкокристаллическим структурам, наблюдается сужение записываемой на голограмме полосы со стороны низких частот, что объясняется наличием инверсного участка зависимости дифракционной эффективности от экспозиции.

Различные типы фильтрации отражают закономерности процесса. Преобладание влияния низкочастотного фильтра объясняется тем, что отображение на перезаписываемой голограмме Фурье ведет к росту d_C , то есть увеличению доли низких частот в спектре образа в плоскости C . Дополнительная низкочастотная фильтрация на голограмме таким образом усиливает действие дифракции на ней в смысле роста d_C и тем самым оценки динамики.

Следует отметить, что не было уделено достаточного внимания анализу зависимости процесса от начального спектра (его ширины). Этот вопрос следует исследовать более внимательно. Также стоит оценить скорость схождения к устойчивому режиму в разных режимах работы. Необходимо исследовать статистику и ее зависимость от параметров ГРС, фильтров и НИО.

Полученные результаты позволят более точно поставить экспериментальное исследование по реализации правдоподобных рассуждений методом голографии Фурье.

Публикации

1. *Исаков К.А., Лялюшкин Л.С., Павлов А.В.* Формирование индуктивного понятия схемой голографии Фурье: влияние итерированного отображения на характеристики гипотезы // II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М., 2013. С. 161–162.
2. *Исаков К.А., Лялюшкин Л.С., Павлов А.В.* О механизме, обеспечивающем адекватность индуктивно формируемой реальности // «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции (Коломна, 20–22 мая 2013). В 3-х т. М., 2013. Т. 1. С. 1004–1016.
3. *Исаков К.А., Лялюшкин Л.С., Павлов А.В.* О порождении информации голографической системой // Голография. Наука и практика: Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо–2013» (Москва, 17–18 сентября 2013 г.). М., 2013. С. 255–260.
4. *Лялюшкин Л.С., Павлов А.В.* Индуктивное формирование понятий в свете вопроса порождения информации // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'13. Научное издание в 4-х томах. М., 2013. Т. 3. С. 172–180.
5. *Исаков К.А., Лялюшкин Л.С., Павлов А.В.* Механизм формирования внутренней коррелированности при порождении понятий на нейросети со связями по схеме голографии Фурье // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 10. С. 44–52.
6. *Лялюшкин Л.С.* Численное моделирование порождения индуктивных понятий методом голографии Фурье // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 147–149.

Литература

1. *Павлов А.В.* Возможность реализации правдоподобных рассуждений методом голографии Фурье // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 5. С. 26–35.
2. *Павлов А.В.* Реализация правдоподобных выводов на нейросетях со связями по схеме голографии Фурье // Искусственный интеллект и принятие решений. 2010. № 1. С. 3–14.
3. *Васильев В.Н., Исаков К.А., Лялюшкин Л.С., Павлов А.В.* Механизм формирования внутренней коррелированности при порождении понятий на нейросети со связями по схеме голографии Фурье // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 10. С. 44–52.
4. *Тушканов Н.Б., Тушканова О.Н.* К построению мультисенсорных систем: принципы работы неокортекса головного мозга при распознавании объектов внешнего мира // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям IS&IT'12. Научное издание в 4-х томах. М., 2012. Т. 2. С. 373–378.
5. *Голицын Г.А., Фоминых И.Б.* Нейронные сети и экспертные системы: перспективы интеграции // Новости искусственного интеллекта. М., 1996. № 4. С. 121–145.
6. *Амосова Л.П., Волкова М.Н.* Оптически управляемые модуляторы света с большим фотоиндуцированным фазовым набегом // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 9. С. 69–75.



Макарова Алена Алексеевна
Факультет точной механики и технологий
Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии
E-mail: alena.etalon@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ГОРЯЧЕГО ГАЗА В ИНФРАКРАСНОЙ ТОМОГРАФИИ

А.А. Макарова

Научный руководитель – профессор В.С. Сизиков

Цели и задачи проекта

В работе рассматривается задача инфракрасной томографии (ИК-томографии) [1] горячих газов (например, пламени лабораторной горелки, плазмы, газа, вытекающего из сопла жидкостного ракетного двигателя).

В ИК-томографии, в отличие от рентгеновской компьютерной томографии, имеет место не только абсорбция (поглощение) сканирующих лучей, проходящих через вещество, но и эмиссия (излучение) самой среды. Это связано с тем, что в области действия рентгеновских лучей (примерно $10^{-5} \div 10^2$ нм) функция Планка имеет очень малые значения, а значит, излучательная способность среды практически отсутствует. В то же время в области длин волн ИК-томографии ($740 \div 2 \cdot 10^6$ нм) функция Планка имеет повышенные значения; из этого следует, что излучательная способность среды существенна. В связи с присутствием в ИК-томографии абсорбции и эмиссии газа, искомыми функциями являются два коэффициента: абсорбции k и эмиссии ε . Поэтому, чтобы экспериментальных функций было также две (I_R и I_g), помимо активного режима (ON) с включенным источником излучения, используется также пассивный (OFF), когда источником излучения является сама среда и на выходе детекторами фиксируется излучение. Это дает возможность получить два интегральных уравнения относительно коэффициента абсорбции k и функции Планка B (а через нее определить температурный профиль T_g).

Целью данного проекта является разработка методики диагностики горячих газов (определение функций k , B и T) методами ИК-томографии с применением двух режимов сканирования – активного и пассивного.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- разработка математического описания процесса прохождения сканирующих лучей через горячую среду в виде системы двух интегральных уравнений при активном и пассивном режимах диагностики среды;
- разработка метода решения системы интегральных уравнений относительно $k(x, y)$ и $B(x, y)$ в общем (несимметричном) случае при выполнении сканирования под различными ракурсами φ , когда $I_R = I_R(x, \varphi)$, $I_g = I_g(x, \varphi)$ (x и y – координаты в некотором сечении);
- разработка метода и алгоритма решения сингулярного интегрального уравнения Абеля относительно $k(r)$ и $B(r)$ для частного случая осевой симметрии среды (r – расстояние от оси симметрии), а также параллельного и веерного сканирований;
- разработка программного пакета для численной реализации предложенной методики диагностики горячего газа.

Основные соотношения

Уравнение переноса ИК-излучения. Рассмотрим горелку [1, 2], создающую ламинарное ровное пламя (рис. 1). Такая горелка часто используется для тестирования различных методов и алгоритмов [1, 2].

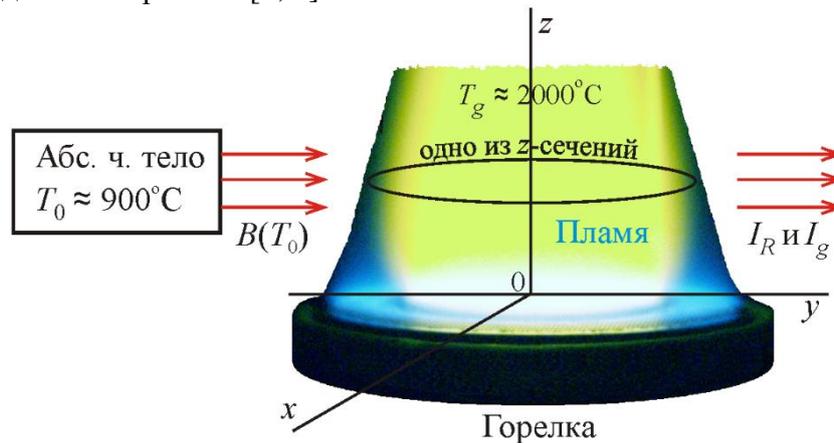


Рис. 1. Горелка

Пусть через некоторое z -сечение пламени параллельно оси y (рис. 1) передается монохроматическое излучение абсолютно черного тела (а. ч. т.):

$$B(T_0) = \frac{2hc^2\nu^3}{e^{h\nu/k_B T_0} - 1}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, $\nu = 1/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, k_B – постоянная Больцмана, T_0 – температура а. ч. т.

Излучение, посылаемое источником (а. ч. т.), испытывает поглощение (абсорбцию) с коэффициентом абсорбции $k = k(x, y)$. Кроме того, среда излучает с коэффициентом излучения $\varepsilon = \varepsilon(x, y) = \varepsilon(T_g(x, y))$, где $T_g = T_g(x, y)$ – распределение температуры по z -сечению среды. Имеет место дифференциальное уравнение переноса излучения с учетом абсорбции и эмиссии, но без рассеяния [1–4]:

$$\frac{dI(x, y)}{dy} = -k(x, y)I(x, y) + \varepsilon(x, y), \quad (2)$$

где $I(x, y)$ – искомая интенсивность излучения, причем $k(x, y) = 0$ при $y(x) < y_1(x)$ и $y(x) > y_2(x)$, где $y_1(x)$ и $y_2(x)$ – границы среды (рис. 2).

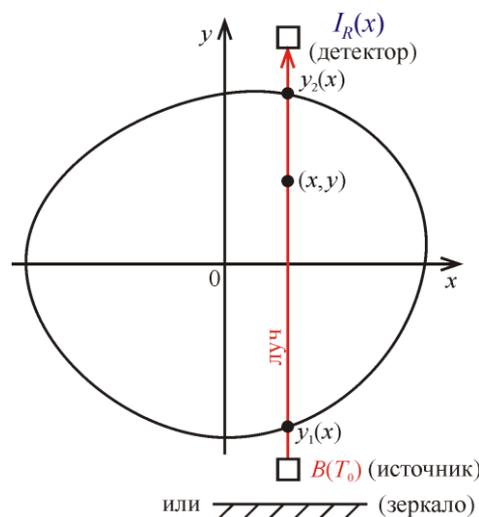


Рис. 2. Прохождение луча через z -сечение пламени

Полагаем, что в каждой точке (x, y) имеет место локальное термодинамическое равновесие [5]. Это позволяет использовать закон Кирхгофа [5]: отношение излучательной и поглощательной способностей равно $\frac{\varepsilon}{k} = B(T_g)$, где $B(T_g)$ – функция Планка для среды:

$$B(T_g) = B(T_g(x, y)) = \frac{2hc^2\nu^3}{e^{hc\nu/k_B T_g(x, y)} - 1}, \quad (3)$$

или $\varepsilon(x, y) = k(x, y)B(T_g(x, y))$. В результате уравнение переноса излучения (2) примет вид [1, 4, 6]:

$$\frac{dI(x, y)}{dy} = k(x, y)[B(T_g(x, y)) - I(x, y)], \quad (4)$$

где x играет роль параметра, то есть уравнение (4) справедливо при каждом фиксированном значении x (рис. 3, где представлена схема параллельного сканирования некоторого z -сечения пламени при некотором ракурсе φ).

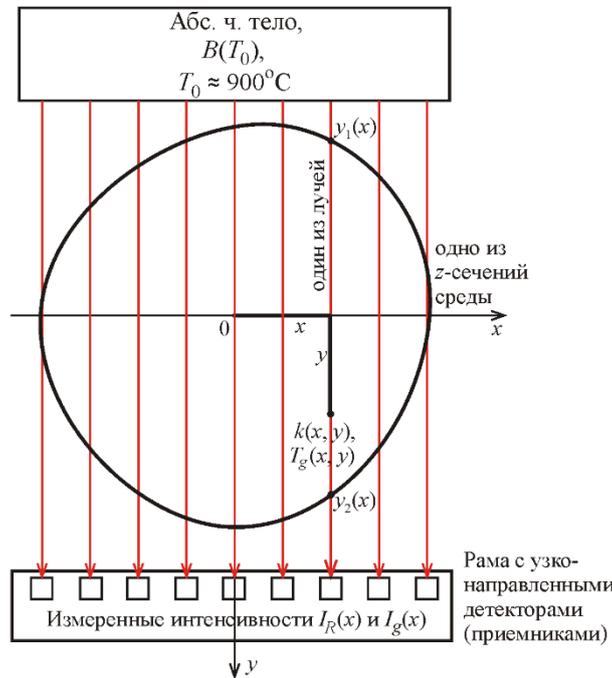


Рис. 3. Параллельное прохождение лучей через z -сечение пламени

Аналитическое решение уравнения переноса излучения. Решение уравнения (4) в виде интенсивности на детекторе имеет вид [1, 2, 6, 7]:

$$I_R(x) = B(T_0) \exp\left(-\int_{y_1(x)}^{y_2(x)} k(x, y) dy\right) + \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} k(x, y) B(T_g(x, y)) \exp\left(-\int_y^{y_2(x)} k(x, y') dy'\right) dy. \quad (5)$$

Соотношение (5) следует рассматривать как интегральное уравнение (ИУ) относительно двух функций k и B . Обозначим измеренную детекторами интенсивность в режиме OFF через $I_g(x)$. Выражение для $I_g(x)$ имеет вид:

$$I_g(x) = \int_{y_1(x)}^{y_2(x)} k(x, y) B(T_g(x, y)) \exp\left(-\int_y^{y_2(x)} k(x, y') dy'\right) dy. \quad (6)$$

Теперь задачу можно сформулировать следующим образом: по двум измеренным функциям I_R и I_g нужно определить две функции k и B путем решения системы двух интегральных уравнений (5) и (6). Однако искомые функции k и B – это функции двух переменных x и y , а исходные (измеренные) функции I_R и I_g – функции лишь одной переменной x . Поэтому необходимо, как в рентгеновской компьютерной томографии, выполнить измерения под разными ракурсными углами φ и получить $I_R(x, \varphi)$ и $I_g(x, \varphi)$ или рассмотреть, например, случай, когда изолинии k и B являются окружностями (случай осевой симметрии) – тогда искомые функции будут функциями одной переменной: $k = k(r)$, $B = B(T_g(r))$, где r – расстояние от оси пламени.

Данную задачу можно упростить. Обозначим через I_T разность двух измеренных функций I_R и I_g , то есть $I_T(x) = I_R(x) - I_g(x)$. Получим уравнение, описывающее процесс абсорбции без эмиссии в активном режиме:

$$I_T(x) = B(T_0) \exp\left(-\int_{y_1(x)}^{y_2(x)} k(x, y) dy\right). \quad (7)$$

В результате получаем не систему двух интегральных уравнений, а два самостоятельных интегральных уравнения, решаемых последовательно: сначала решается уравнение (7) относительно $k(x, y)$, а затем уравнение (6) относительно $B(T_g(x, y))$ при уже найденной $k(x, y)$. После вычисления $B(T_g(x, y)) = B(x, y)$ можно рассчитать температурный профиль (см. (3)):

$$T_g(x, y) = \frac{h\nu/k_B}{\ln\left(\frac{2hc^2\nu^3}{B(x, y)} + 1\right)}. \quad (8)$$

При этом функции I_T и I_g должны быть получены, как сказано выше, под различными ракурсами φ , то есть получены $I_T(x, \varphi)$ и $I_g(x, \varphi)$ или же рассмотрена схема осевой симметрии (при одном ракурсе), когда $I_T = I_T(x)$, $I_g = I_g(x)$, $k = k(r)$.

Численные иллюстрации

На рис. 4 представлены измеренные функции $I_{R,m}(x)$ и $I_{g,m}(x)$, а также $I_{T,m}(x) = I_{R,m}(x) - I_{g,m}(x)$ на следующей сетке узлов:

$$x = 0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2; 2,4; 2,8; 3,2; 3,6; 3,8 \text{ см} \quad (9)$$

при $\nu = 2271,496 \text{ см}^{-1}$, $T_0 = 894,4^\circ\text{C}$, $n = 12$, НАВ = 12 мм (height above burner). Измерения выполнены в Laboratory Risø DTU, Denmark в рамках совместного проекта.

На рис. 5 представлен найденный температурный профиль среды (осесимметричного пламени горелки) $T_g(r)$ по $B(r)$ (без регуляризации) и $T_{g\alpha}(r)$ по $B_\alpha(r)$ (с регуляризацией). Для сравнения приведен также один из температурных профилей $T_H(r)$, полученных методом CARS также для газовой горелки, но с несколько иными условиями. Видим заметные различия, но качественно картинки похожие.

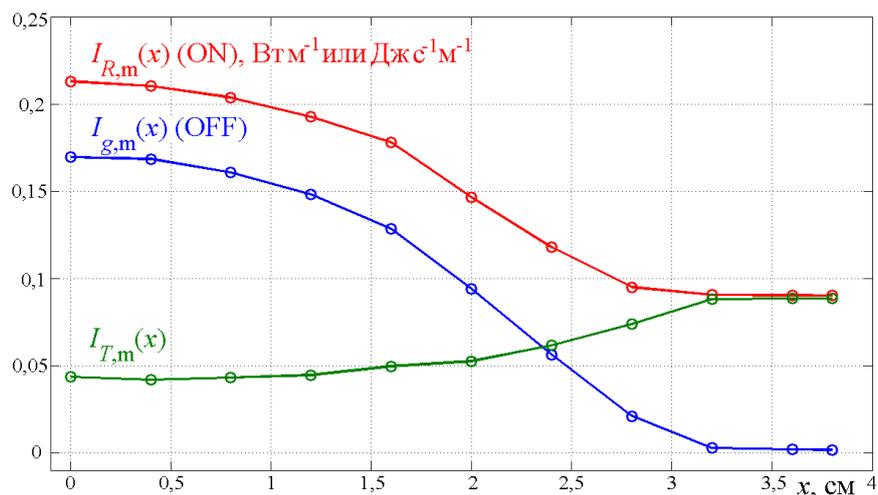


Рис. 4. Измеренные функции $I_{R,m}(x)$, $I_{g,m}(x)$ и $I_{T,m}(x)$

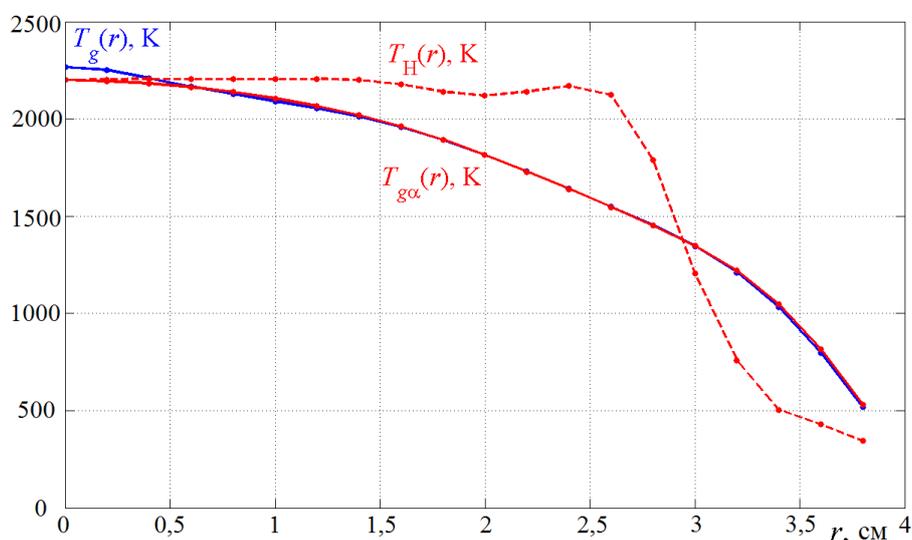


Рис. 5. Температурные профили: $T_g(r)$ – без регуляризации; $T_{g\alpha}(r)$ – с регуляризацией и $T_H(r)$ по методике CARS

Видим, что результаты с регуляризацией и без нее (но со сглаживанием и обобщенными квадратурами) получились весьма близкими. Это подтверждает факт того, что задача решения сингулярных интегральных уравнений является умеренно некорректной и обладает свойством саморегуляризации.

Заключение

Изложена по-новому известная ИК-методика определения коэффициента абсорбции k и функции Планка среды B (по которой можно определить температурный профиль T_g). Активно-пассивная диагностика позволяет получить две экспериментальные функции и два новых интегральных уравнения относительно k и B . Рассмотрен случай осевой симметрии (и параллельного сканирования), для которого справедливы сингулярные интегральные уравнения (СИУ) Абеля. Сформулирован (в новой редакции) обобщенный метод квадратур их решения относительно k и B . Выполнена обработка экспериментальных данных в двух вариантах: путем решения СИУ обобщенным методом квадратур и методом регуляризации Тихонова – причем без сглаживания и со сглаживанием экспериментальных данных. Она подтвердила, что СИУ обладает саморегуляризацией, задача его решения является умеренно некорректной и использование обобщенного метода квадратур с предварительным сплайн-

сглаживанием экспериментальных данных позволяет получить практически такие же результаты, как и методом регуляризации Тихонова.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00442) и DTU, Denmark (Project No. 010246).

Публикации

1. *Макарова А.А.* Уравнения переноса излучения в инфракрасной томографии в случае активно-пассивной диагностики и веерного сканирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 207–208.
2. *Макарова А.А.* Определение коэффициента поглощения и температурного профиля горячего газа // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 163–164.
3. *Макарова А.А.* Разработка методов ИК-томографии горячего газа // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров НИУ ИТМО. СПб., 2013. С. 67–70.
4. *Макарова А.А.* ИК-томография горячего газа: активно-пассивная диагностика, осевая симметрия и параллельное сканирование // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2013. С. 70–72.

Литература

1. *Tourin R.H., Krakow B.* Applicability of infrared emission and absorption spectra to determination of hot gas temperature profiles // Applied Optics. 1965. Vol. 4. No 2. P. 237–242.
2. *Hall R.J., Bonczyk P.A.* Sooting flame thermometry using emission/absorption tomography // Applied Optics. 1990. Vol. 29. No 31. P. 4590–4598.
3. *Пикалов В.В., Преображенский Н.Г.* Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. Новосибирск, 1987. – 239 с.
4. *Goody R.M., Yung Y.L.* Atmospheric radiation. Theoretical basis. 2nd ed. New York, 1989. – 536 p.
5. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М., 1984. – 944 с.
6. *Пикалов В.В., Мельникова Т.С.* Низкотемпературная плазма. Т. 13. Томография плазмы. Новосибирск, 1995. – 229 с.
7. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд. М., 1986. – 544 с.



Маргун Алексей Анатольевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: alexeimargun@gmail.com

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ

А.А. Маргун

Научный руководитель – доцент А.С. Кремлев

Мощное развитие промышленности и информационных технологий, наблюдающееся в современном обществе, требует увеличения производственных мощностей, для чего

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

в качестве решения широкого класса задач используется робототехника благодаря высокой производительности труда, скорости выполнения операций, низким затратам на обслуживание и высокому качеству выполняемых операций (рис. 1).



Рис. 1. Промышленный манипулятор

Однако существует широкий класс задач, в которых использование робототехнических комплексов затруднительно. К ним относится функционирование в нестационарной среде, использование инструментов, имеющих собственную мощную динамику, манипулирование грузами с неизвестными массогабаритными параметрами и задачи прецизионного управления.

Целью проекта является исследование и использование адаптивных и робастных алгоритмов управления роботами, которые настраивались бы в зависимости от внешних условий и позволяли бы компенсировать внешние и внутренние возмущающие воздействия, запаздывание в каналах управления и измерения, нестационарность окружающей среды и неучтенную динамику системы [1–4]. В рамках данного проекта была поставлена задача синтеза адаптивной системы управления роботами-манипуляторами, обеспечивающей асимптотическую устойчивость при функционировании в условиях неточно известных параметров системы и внешних возмущающих воздействий.

Уравнение динамики манипулятора, полученное при помощи метода Эйлера-Лагранжа, имеет следующий вид:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau, \quad (1)$$

где D – матрица инерции, C – матрица кориолисовых и центробежных сил, G – матрица потенциальных сил, τ – вектор-столбец управляющих моментов сил, действующий на звено манипулятора, q – обобщенные координаты.

Данная система является нелинейной с перекрестными связями, что значительно затрудняет разработку системы управления. Для упрощения синтеза воспользуемся линеаризацией обратной связью. Для этого подадим на систему нелинейное управление вида [5]:

$$\tau = M(q)a + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q). \quad (2)$$

Тогда замкнутая система имеет вид:

$$\ddot{q} = a. \quad (3)$$

Преобразованная система является набором независимых двойных интеграторов. В данной системе a – новое виртуальное входное воздействие. Перепишем полученную линейную систему в форме «вход-выход»:

$$q_m(t) = \frac{b(p)}{a(p)}[u(t) + w(t)], \quad (4)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования, $u(t)$ – сигнал управления; $w(t)$ – известное возмущение; измеряется выходная переменная $q_m(t)$, но не ее производные; $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$, $a(p) = p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$ – полиномы с неизвестными параметрами; $m \leq n-1$; передаточная функция $\frac{b(p)}{a(p)}$ имеет относительную степень $\rho = n - m$; полином $b(p)$ гурвицев и коэффициент $b_m > 0$.

Командный сигнал $q_m^*(t)$ доступен измерению, а его производные с первой по ρ -ю ограничены:

$$\left| \frac{d^i q_m^*(t)}{dt^i} \right| \leq C_0 < \infty, \quad (5)$$

где $i = \overline{0, \rho}$.

Относительно возмущения положим, что функция $w(t)$ возрастает не более чем экспоненциально, и относительно нее задана мажоранта $\omega(t) \geq |w(t)|$.

Основываясь на методе последовательного компенсатора [6, 7], выберем закон управления следующим образом:

$$u_k = -(\mu + \psi)\alpha(p)\bar{e}, \quad (6)$$

где μ и гурвицев полином $\alpha(p)$ степени $\rho-1$ рассчитываются из соображений строгой вещественной положительности передаточной функции $H(p) = \frac{b(p)\alpha(p)}{a(p) + \mu b(p)\alpha(p)}$; функция

$\psi = \psi(t)$ предназначена для парирования влияния возмущения и повышения точности слежения за командным сигналом; а функция \bar{e} формируется алгоритмом вида:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 e) \end{cases}, \quad (7)$$

$$\bar{e} = \xi_1, \quad (8)$$

где $e = \theta - \theta^*$ – ошибка, $\sigma > \mu + \psi$, а коэффициенты k_i рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (7) при $e = 0$.

Для полученной выше передаточной функции манипулятора (3) регулятор вида (7-8) примет вид:

$$\begin{aligned} u_k &= -(\mu + \psi)\alpha(p)\xi_1, \mu + \psi = k, \\ \dot{\xi}_1 &= \sigma(-k_1 \xi_1 + k_1 e) \end{aligned} \quad (9)$$

Адаптивной настройкой коэффициентов μ , ψ , σ является их увеличение до тех пор, пока не будет выполнено следующее целевое условие [8, 9]:

$$|e(t)| < \Delta \text{ для некоторого } t \geq t_1,$$

где Δ – некоторое положительное число, которое можно уменьшить, выбрав соответствующий закон управления.

Для реализации этой идеи можно воспользоваться алгоритмом настройки [8, 9]:

$$\tilde{k}(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau,$$

где $\tilde{k} = \mu + \psi$, а функция $\lambda(t)$ рассчитывается следующим образом:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0, \text{ при } |e(t)| > \Delta \\ 0, \text{ при } |e(t)| \leq \Delta \end{cases},$$

где $\lambda_0 > 0$.

Учитывая, что $\sigma > \mu + \psi$, выберем σ следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 \tilde{k}^2,$$

где $\sigma_0 > 0$.

Таким образом, уравнения (9) представляют собой закон адаптивного управления манипулятором в условиях нестационарных параметров и внешних возмущающих воздействий.

Для подтверждения работоспособности закона управления на основании метода линеаризации обратной связью и метода «последовательного компенсатора» было проведено его испытание на модели плоского двухзвенного манипулятора (рис. 2) в программной среде Matlab/Simulink. Данная модель была выбрана для простоты рассмотрения. Поскольку предложенный метод основан на развязывании связей в системе, то его применимость для двухзвенного плоского механизма подтвердит пригодность и для пространственных механизмов с произвольным количеством степеней свободы.

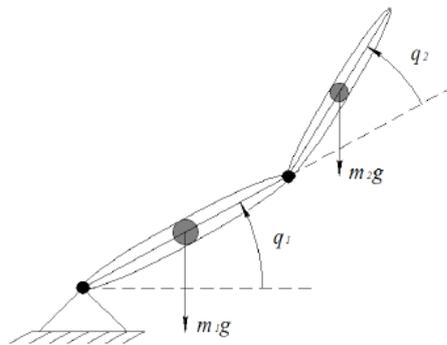


Рис. 2. Плоский двухзвенный манипулятор

Уравнение динамики имеет вид:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau. \quad (10)$$

Закон управления выберем способом, указанным выше, и проведем его сравнение с управлением линеаризацией обратной связью и ПД-регулятором в условиях неточно известных параметров и внешних возмущающих воздействий.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования при отклонении параметров системы от номинальных на 20 % в задаче слежения за гармоническим входным сигналом.

Также было проведено моделирование при отклонении параметров от номинальных и наличии внешних возмущающих воздействий (рис. 5 и 6). Возмущающее воздействие имело вид сдвинутого мультигармонического сигнала с амплитудой такого же порядка, как и задающее воздействие.

Возмущающее воздействие: $10 + \sin(2t + 0,2) + 2 \sin(4t + 0,3)$.

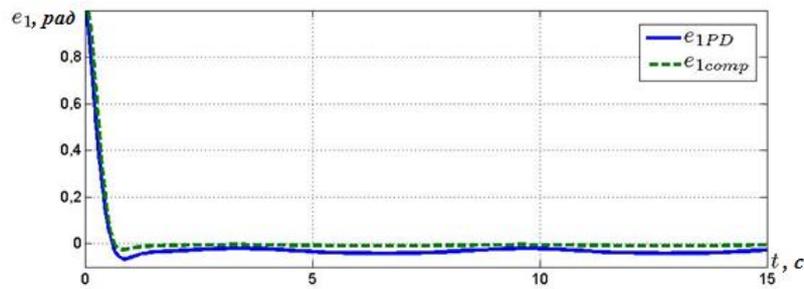


Рис. 3. Графики ошибки положения первого звена при отклонении номинальных параметров на 20 %

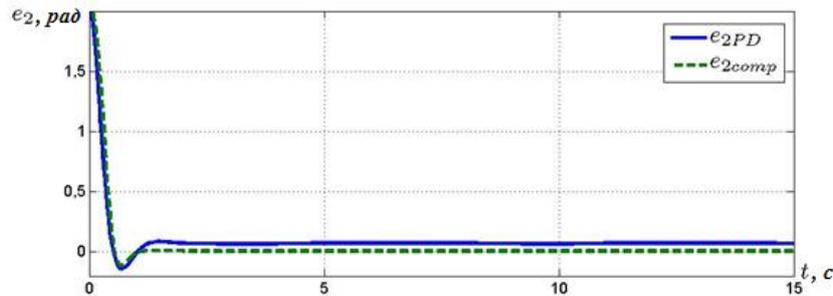


Рис. 4. Графики ошибки положения второго звена при отклонении номинальных параметров на 20 %

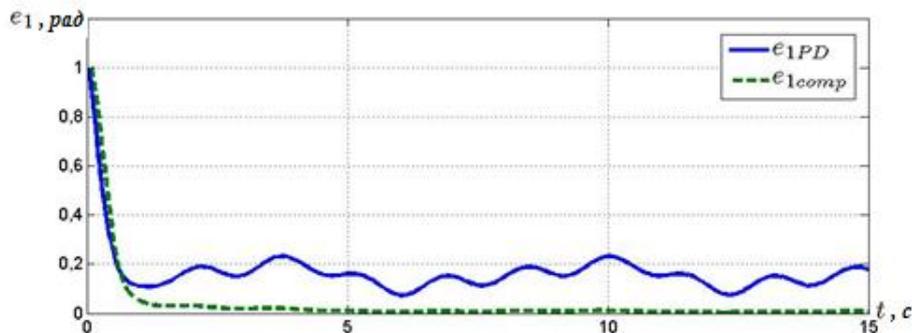


Рис. 5. Графики ошибки положения первого звена при внешнем возмущающем воздействии

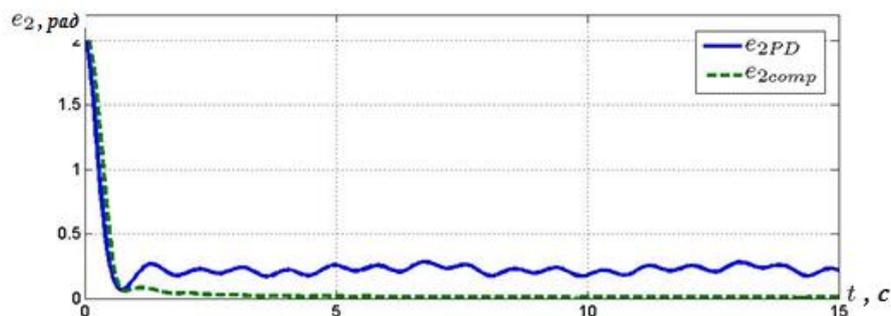


Рис. 6. Графики ошибки положения второго звена при внешнем возмущающем воздействии

В ходе выполнения данной работы были изучены области применения роботов-манипуляторов и основные проблемы в их использовании и управлении.

Было получено уравнение динамики манипуляционных устройств в матричном виде с использованием метода Эйлера-Лагранжа. Выполнен обзор современных существующих методов управления манипуляционными устройствами и выявлена необходимость разработки законов управления, функционирующих в условиях неточно известных параметров, неучтенной динамики и внешних возмущающих воздействий, а также обладающих простотой инженерной реализации и низкой вычислительной сложностью.

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

Разработан алгоритм управления робототехническим манипулятором на базе линеаризации обратной связью и метода «последовательного компенсатора» с адаптивной подстройкой параметров регулятора.

Было проведено моделирование и сравнение предложенного метода и управления на базе метода линеаризации обратной связью и ПД-регулятора в среде Matlab/Simulink. В качестве объекта моделирования был выбран плоский двухзвенный манипулятор с неточно известными параметрами (отклонение от номинальных составляло 20 %). Предложенный метод показал свою эффективность и асимптотическую устойчивость.

При моделировании в условиях внешних возмущающих воздействий в канале управления предложенный метод показал более низкое значение установившейся ошибки в сравнении с ПД-регулятором.

Таким образом подтверждена эффективность предложенного регулятора, построенного на базе метода «последовательного компенсатора» и линеаризации обратной связью. При его использовании система обладает асимптотической устойчивостью в условиях внешних возмущающих воздействий и неучтенной динамики.

Публикации

1. Маргун А.А., Зименко К.А., Базылев Д.Н., Бобцов А.А., Кремлев А.С. Адаптивное управление двухзвенным роботом-манипулятором на базе метода последовательного компенсатора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 79–85.
2. Bazylev D.N., Zimenko K.A., Margun A.A., Bobtsov A.A., Kremlev A.S. Adaptive control system for quadrotor equipped with robotic arm // 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR 2014). 2014. P. 705-710.
3. Маргун А.А., Зименко К.А., Базылев Д.Н., Бобцов А.А., Кремлев А.С., Ибраев Д.Д., Чех М. Система управления беспилотным летательным аппаратом, оснащенным робототехническим манипулятором // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6 (94). С. 54–62.
4. Margun A.A., Zimenko K.A., Bazylev D.N., Bobtsov A.A., Kremlev A.S. Application of "consecutive compensator" method for robotic manipulator control // 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2014. P. 341–345.

Литература

1. Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot modeling and control. 2005. – 496 p.
2. Шаньгин Е.С. Управление роботами и робототехническими системами. Уфа, 2005. – 188 с.
3. Юревич Е.И. Управление роботами и робототехническими системами. СПб., 2001. – 171 с.
4. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами. М., 2005. – 480 с.
5. Ortega R., Spong M.W. Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial // Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control. 1988. Vol. 2. P. 1575–1584.
6. Бобцов А.А. Адаптивное и робастное управление неопределенными системами по выходу. СПб., 2011. – 174 с.
7. Bobtsov A.A., Kapitonov A.A., Nikolaev N.A. Control over the output of nonlinear systems with unaccounted-dynamics // Automation and Remote Control. 2010. Vol. 71. No 12. P. 2497–2504.
8. Bobtsov A.A., Nagovitsina A.G. Adaptive control of linear nonstationary objects output // Automation and Remote Control. 2006. Vol. 67. No 12. P. 2010–2020.
9. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // Автоматика и телемеханика. 2005. № 1. С. 118–129.



Мелихов Иван Федорович
Естественнонаучный факультет
Кафедра высшей математики
E-mail: ivan.melikhov@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО СПЕКТРА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЧАСТИЦ В ДЕФОРМИРОВАННОМ ВОЛНОВОДЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ХАРТРИ-ФОКА

И.Ф. Мелихов

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

В последнее время интерес к нанотехнологиям неуклонно растет как в нашей стране, так и во всем мире. Стоит отметить, что по-настоящему «нано» могут считаться только те технологии, которые принципиально невозможны в больших масштабах. Таким образом наноустройства – это не просто уменьшенная в размерах версия макроустройств. Они основаны на принципиально новых для техники явлениях, проявляющихся только в микромире. Неудивительно, что для теоретического описания принципов работы подобных устройств широко применяется аппарат квантовой механики.

Целью данной работы является исследование дискретного спектра гамильтониана системы частиц, помещенных в деформированный волновод. Дискретный спектр интересен тем, что его значениям соответствуют связанные состояния системы. Эта задача может быть переформулирована как исследование вопроса о возможности локализации и хранения частиц в волноводе.

Задача работы – изучить зависимость количества вмещаемых волноводом частиц от его величины деформации.

Приложения такой задачи могут быть весьма интересны. Одно из них – локализация двух электронов для проведения двухкубитовой операции в квантовом компьютере. Второе возможное применение – создание водородного аккумулятора, основанного на нанослоистой структуре. В последнее время появляется все больше техники на водородном топливе, однако у него есть недостаток: крайняя взрывоопасность. Как правило, для транспортировки водородного топлива используются баллоны. В настоящее время широко изучается вопрос его хранения в наноструктурных материалах. Подобные твердотельные аккумуляторы обладали бы большей безопасностью, устойчивостью к механическим и температурным воздействиям, занимали бы меньше объема и были бы более пригодны для транспортировки.

Одним из перспективных для этой цели является материал с нанослоистой структурой. Эксперименты показали, что после обогащения такой структуры водородом его концентрация вблизи дефектов и неоднородностей структуры возрастает.

Строя математическую модель этого явления, можно рассматривать частицы в нанослое как частицы, помещенные в волновод. Было показано, что если в прямом волноводе находится одна частица, то в нем не возникает связанных состояний и хранение частиц принципиально невозможно. Однако при наличии деформации геометрии волновода у системы появляется дискретный спектр, и частица локализуется вблизи дефекта [1–9]. Характерно, что чем больше возмущение, тем дальше смещается собственное число гамильтониана от границы непрерывного спектра.

Для системы из нескольких взаимодействующих частиц найти точное решение не представляется возможным. Для упрощения постановки задачи используется метод Хартри-Фока. Полученные после его применения дифференциальные уравнения решаются методом конечных элементов.

В работе исследуются три вида деформации волновода: волновод с деформированной границей (рис. 1), два волновода, связанные через окно (рис. 2), и изогнутый волновод (рис. 3). Для каждой конфигурации введем параметр α , характеризующий величину деформации волновода. Для первой геометрии деформацию зададим формулой $H \sin\left(\frac{x+b}{2b}\pi\right)$ и определим $\alpha = H/L$, ширину возмущения зафиксируем: $b = 0,4L$; для второй геометрии $\alpha = a/L$; для третьей – $\alpha = L/R$, с фиксированной длиной искривленной части: $c = L$. Для всех конфигураций большее значение параметра α соответствует большей деформации. На стенках волновода (сплошная линия на рис.1–3) задается условие Дирихле. На боковых стенках (пунктирная линия) полагается условие Неймана.

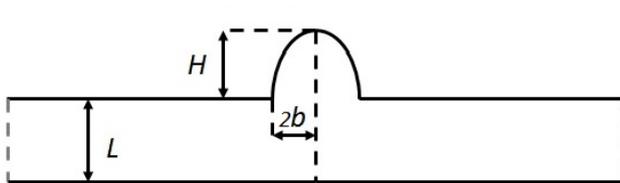


Рис. 2

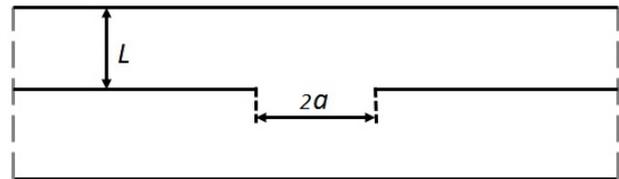


Рис. 3

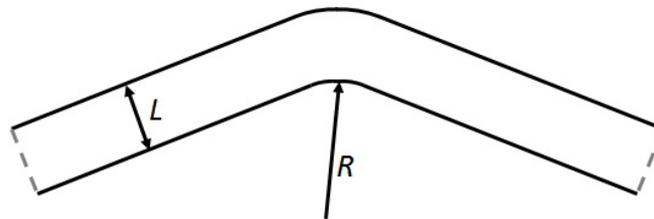


Рис. 4

В задаче также изучается два вида взаимодействия между частицами: дельта-типа, которое хотя и является грубым упрощением реального взаимодействия, сильно упрощает решение задачи, и кулоновского типа, описывающего реальное взаимодействие между частицами.

В ходе численного эксперимента была выбрана наиболее эффективная с точки зрения вместимости частиц конфигурация деформации волновода.

В работах, посвященных изучению поведения одной частицы, было показано, что при большей деформации волновода дискретный спектр системы смещается дальше от границы непрерывного спектра. При наличии двух частиц с одинаковым знаком заряда при достаточной интенсивности взаимодействия связанное состояние будет разрушаться. Более того, частицы взаимодействуют неявно, подчиняясь принципу Паули. Таким образом в системе присутствуют конкурирующие факторы: деформация волновода с одной стороны и интенсивность взаимодействия и принцип Паули – с другой, от которых зависит возможность получения связанных состояний системы. В ходе исследования была изучена эта зависимость в нескольких частных случаях.

Хранение частиц без взаимодействия

Минимальные значения параметра деформации, при которых возможно хранить в волноводе заданное количество частиц с одинаковым спином, приведены в Таблице. Фактически при отсутствии явного взаимодействия между частицами единственным фактором, разрушающим связанные состояния, является принцип Паули. При отсутствии взаимодействия две частицы с разными спинами описываются пространственной волновой функцией свободной частицы, поэтому для их хранения достаточно малой деформации при любой геометрии. Видно, что для хранения двух и больше частиц с одинаковым спином подходят только волноводы, связанные через окно. С точки зрения локализации частиц – это самая эффективная конфигурация.

Таблица
Значения параметра деформации

Количество частиц с одинаковым спином	Волновод с деформированной границей	Связанные волноводы	Изогнутый волновод
1	$\alpha > 0$	$\alpha > 0$	$\alpha > 0$
2	-	0,77	-
3	-	1,32	-
4	-	1,95	-
5	-	2,50	-

Вместимость волноводов, связанных через окно

Изучим возможности хранения частиц в двух волноводах, связанных через окно. На рис. 4–6 показана электронная плотность для различного числа частиц, взаимодействующих посредством дельта-потенциала. Как и ожидалось, частицы локализируются вблизи дефекта – окна.

Уже отмечалось, что на наличие дискретного спектра влияют разные факторы: взаимодействие между частицами и величина возмущения волновода. На рис. 7 показана область на плоскости $U_c - \alpha$, в которой связанное состояние существует, для случая двух частиц с нулевым суммарным спином, взаимодействующих посредством кулоновского потенциала. Подобная область для дельта-потенциала была приведена в работе [10]. Видно, что чем сильнее взаимодействуют частицы, тем больше необходимая для их хранения величина деформации α . Вследствие плохой сходимости итерационного метода для больших значений интенсивности взаимодействия U_c точную границу области найти не удалось.

Для дельта-потенциала была построена зависимость минимальной деформации от числа частиц и суммарного спина системы, приведенная на рис. 8. При фиксированном количестве частиц нижние точки на графике соответствуют системам с меньшим суммарным спином. Видно, что чем больше количество частиц с одним спином, тем большая деформация требуется, чтобы их удержать. Таким образом, главным фактором, разрушающим связанные состояния, является принцип запрета Паули. Результаты, отображенные на графике, также можно трактовать с практической точки зрения. Наиболее пригодной для хранения является система с минимальным суммарным спином. Из графика видно, что для хранения четного числа частиц с нулевым суммарным спином необходима та же деформация, что и для системы на одну частицу меньше.

Заключение

В работе был исследован дискретный спектр гамильтониана системы, состоящей из нескольких одинаковых фермионов, помещенных в искаженный волновод. С физической точки зрения задачу можно переформулировать как изучение возможностей локализации и хранения частиц в деформированных нанослоистых структурах.

Для упрощения многочастичной задачи был использован широко известный в квантовой химии метод Хартри-Фока. Он позволяет свести задачу решения уравнения Шрёдингера для многочастичного гамильтониана к отысканию одночастичных волновых функций, учитывая при этом свойство антисимметричности системы по отношению к замене двух частиц ~ принцип Паули.

В работе были изучены три различные геометрии дефекта волновода: с деформированной границей, два волновода, связанные через окно, и изогнутый волновод. Также изучались два вида взаимодействия между частицами: упрощенное дельта-типа и кулоновское. Для расчета использовался метод конечных элементов.

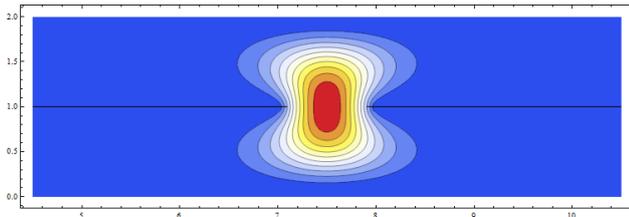


Рис. 5. Электронная плотность для системы из двух электронов с разными спинами

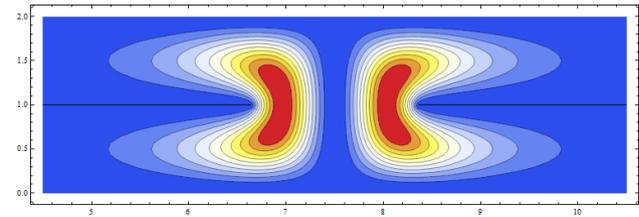


Рис. 6. Электронная плотность для системы из двух электронов с одинаковыми спинами

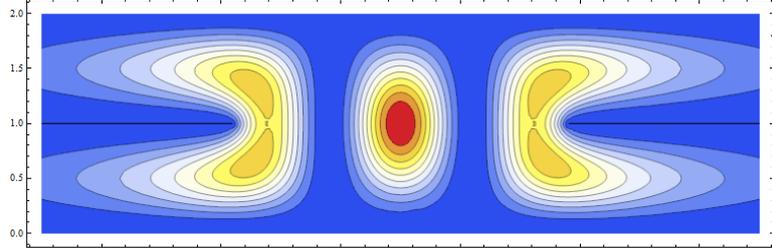


Рис. 7. Электронная плотность для системы из трех электронов с одинаковыми спинами



Рис. 8. Область допустимых значений интенсивности взаимодействия и величины деформации. Две частицы, нулевой суммарный спин, кулоновский потенциал, $E_0 = \hbar^2/(2mL^2)$

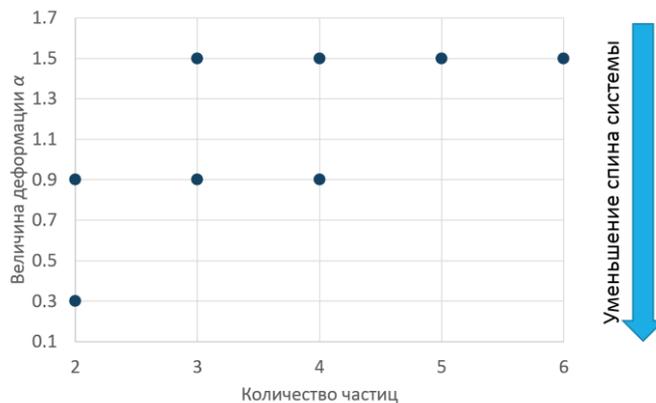


Рис. 9. Вместимость двух волноводов, связанных через окно. Дельта-потенциал

Расчеты при отсутствии взаимодействия (в этом случае фактором, разрушающим связанные состояния системы, является только принцип Паули) показали, что наиболее эффективной с точки зрения хранения частиц является геометрия двух связанных волноводов. Только она позволяет хранить две и больше частиц с одинаковым спином. Эта конфигурация волноводов была использована для исследования возможности хранения частиц с разным взаимодействием. Было показано, что основная трудность заключается в локализации частиц с одинаковым спином.

Дальнейшее развитие работы может идти по нескольким путям. Во-первых, можно доработать программу, чтобы иметь возможность рассчитывать конфигурацию системы на других геометриях. Интересно было бы сравнить поведение частиц при кулоновском и дельта-потенциалах. Во-вторых, можно изучать другие виды взаимодействия, например, описываемые потенциалом Леннарда-Джонса. В-третьих, для случая дельта-взаимодействия видится возможным обобщение задачи на трехмерное пространство. В такой постановке она была бы еще более реалистичной.

Работа поддержана в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме: «Исследование квантово-механических моделей и связанных с ними задач теории операторов, формирующих фундаментальный базис для задач нанотехнологии» (ГК №07.514.11.4146).

Публикации

1. *Melikhov I.F., Popov I.Y.* Hartree–Fock approximation for the problem of particle storage in deformed nanolayer // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013. Vol. 4. No 4. P. 559–563.
2. *Melikhov I.F.* Particle storage in a nanolayer: Hartree–Fock approximation // *Days on Diffraction 2013: International Conference*. Saint-Petersburg, May 27–31, 2013. Abstracts. 2013. P. 63.
3. *Мелихов И.Ф.* Метод Хартри–Фока для нахождения связанных состояний системы взаимодействующих квантовых частиц в деформированном нанослое // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых*. Вып. 2. СПб., 2013. С. 216–217.
4. *Мелихов И.Ф.* Изучение дискретного спектра многочастичного гамильтониана с помощью метода Хартри–Фока // *Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых*. Вып. 2. СПб., 2014. С. 291.

Литература

1. *Duclos P., Exner P., Štoviček P.* Curvature-induced resonances in a two-dimensional Dirichlet tube // *Annales de l'I.H.P. Physique théorique*. 1995. Vol. 62. No 1. P. 81–101.
2. *Duclos P., Exner P., Krejčírik D.* Locally curved quantum layers // *Ukrainian Journal of Physics*. 2000. Vol. 45. P. 595–601.
3. *Exner P., Vugalter S.A.* Asymptotic estimates for bound states in quantum waveguides coupled laterally through a narrow window // *Annales de l'I.H.P. Physique théorique*. 1996. Vol. 65. No 1. P. 109–123.
4. *Exner P., Vugalter S.A.* Bound states in a locally deformed waveguide: the critical case // *Letters in Mathematical Physics*. 1997. Vol. 39. No 1. P. 59–68.
5. *Exner P., Šeba P., Tater M., Vaněk D.* Bound states and scattering in quantum waveguides coupled laterally through a boundary window // *Journal of Mathematical Physics*. 1996. Vol. 37. P. 4867–4887.
6. *Popov I.Y.* Asymptotics of bound state for laterally coupled waveguides // *reports on Mathematical Physics*. 1999. Vol. 43. No 3. P. 427–437.
7. *Popov I.Y.* Asymptotics of resonances and bound states for laterally coupled curved quantum waveguides // *Physics Letters A*. 2000. Vol. 269. No 2–3. P. 148–153.
8. *Exner P., Vugalter S.A.* On the number of particles that a curved quantum waveguide can bind // *Journal of Mathematical Physics*. 1999. Vol. 40. P. 4630–4638.

9. *Linde H.* Geometrically induced two-particle binding in a waveguide // *Journal of Physics A: Mathematical and General.* 2006. Vol. 39. No 18. P. 5105–5114.
10. *Popov S.I., Gavrilov M.I., Popov I.Y.* Two interacting particles in deformed nanolayer: discrete spectrum and particle storage // *Physica Scripta.* 2012. Vol. 56. No 3. P. 035003.



Мелихова Алина Семеновна
Естественнонаучный факультет
Кафедра высшей математики
E-mail: alina.s.melikhova@gmail.com

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПРЯМОЙ ЦЕПОЧКИ СЛАБО СВЯЗАННЫХ ШАРООБРАЗНЫХ РЕЗОНАТОРОВ С УСЛОВИЕМ ДИРИХЛЕ НА ГРАНИЦЕ

А.С. Мелихова (Аникевич)

Научный руководитель – профессор И.Ю. Попов

На данный момент весьма обширной и довольно привлекательной областью науки, захватывающей интересы как теоретиков, так и практиков, является все то, что принято называть нанотехнологиями. И в первую очередь это касается квантовой механики. Теперь сложно представить некоторые области современной науки (электронику, молекулярную биологию и другие) без тех возможностей, которые нам открыл этот новый взгляд на мир.

С математической точки зрения большой интерес вызывают так называемые явно решаемые модели квантовой механики. Речь идет о моделях, задающихся оператором Шредингера с потенциалами, сосредоточенными на дискретном множестве точек. Эти модели служат хорошей теоретической основой для построения множества существующих моделей.

Совершенно естественно, что создание хороших моделей очень интересно именно с практической точки зрения. Ведь имея модель, можно сконструировать систему с требуемыми практиками и предсказанными теоретиками свойствами. На данный момент уже появились системы, существование которых ранее было просто невысказанным. Это такие объекты, как квантовые точки [1], квантовые провода [2], графен [3], нанотрубки [4], фуллерен [5] и т. д.

Среди всех этих структур можно еще выделить так называемый наностручок – систему, представляющую собой нанотрубку, заполненную молекулами фуллерена. Есть ряд экспериментальных работ [6], описывающих процесс создания подобных систем и их свойства. Поэтому очень важно создать математическую модель для описания такой структуры.

Данный проект посвящен построению математической модели прямой цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов с условием Дирихле на границе, составленной из идентичных шарообразных резонаторов, соединенных между собой точечными отверстиями (в точках соединения предполагается наличие условия дельта-соединения).

Основной целью проекта является построение этой модели в рамках теории самосопряженных расширений симметрических операторов и ее дальнейший спектральный анализ. То есть в результате предполагается получить решение спектральной задачи для построенной таким образом модели, а именно, выяснить зависимость зонной структуры,

соответствующей модельному оператору, от параметров рассматриваемой системы (в данном случае – от «интенсивности соединения» в точках сочленения резонаторов).

Рассматриваемая в данном проекте модель объединяет в себе идеи нескольких моделей: квантовых графов цепочечного типа [7] и точечного отверстия [8].

В рамках данного проекта модель прямой цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов строится на основе теории самосопряженных расширений симметрических операторов [9, 10]. Рассматривается прямая цепочка, то есть такая, центры всех резонаторов которой и точки их соединения лежат на одной прямой; а также предполагается наличие дельта-потенциала в точках соединения резонаторов (одинакового для всех точек с константой связи $\alpha \in \mathbb{R}$). Будет решаться стационарное уравнение Шредингера.

Для описания модельного гамильтониана необходимо сначала рассмотреть простейший случай – систему, состоящую только из двух резонаторов, а потом обобщить ее на случай бесконечного их количества.

Для анализа периодических структур существует несколько подходов. В данной работе будем пользоваться методом матриц монодромии, а именно, следующими их свойствами:

- своим матричным уравнением она выражает линейную зависимость амплитуд волновых функций;
- зная матрицу монодромии, скажем, для перехода от шара номер $j-1$ к шару номер j и матрицу перехода от j -ого шара к $j+1$, с помощью их произведения (в обычном смысле) можно получить матрицу, связывающую $j-1$ -й и $j+1$ -й шары.

Результаты

В работе на основе указанных выше методов была построена модель прямой цепочки. Также было показано, что модельный гамильтониан имеет непрерывный спектр зонной структуры, а значит, нас интересуют границы зон непрерывного спектра в зависимости от параметров системы (константы связи α).

Используя подход матриц монодромии, получены условия для нахождения зон непрерывного спектра в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_D - F_D \leq -\frac{\alpha}{2}, \\ f_D + F_D \geq -\frac{\alpha}{2}, \\ F_D > 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} f_D - F_D \geq -\frac{\alpha}{2}, \\ f_D + F_D \leq -\frac{\alpha}{2}, \\ F_D < 0; \end{array} \right.$$

где f_D и F_D – вторые производные соответствующих функций Грина, вычисленные в точках сочленения резонаторов (в одной точке и в диаметрально противоположных). Нас интересуют решения данной системы для всех возможных значений α .

После разбиения оси энергий на пять типовых интервалов и выделения асимптотического поведения левых частей неравенств, задействованных в рассматриваемой системе, стало возможным выписать значения для обеих границ зон непрерывного спектра на каждом таком интервале. Таким образом, была полностью описана структура спектра для всех возможных значений константы связи α , что и является основным результатом данной работы.

Описанная в работе модель может быть использована для построения реальной физической системы с заранее определенными свойствами, так как данная математическая модель позволяет найти такие параметры системы, которые обеспечат ее требуемые спектральные свойства, и наоборот, предсказать спектральные свойства системы, зная константы связи резонаторов.

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 резонаторов // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2012. С. 249.
3. *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.
4. *Аникевич А.С.* Спектральная задача для цепочек слабо связанных шарообразных резонаторов // XVII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов: Сборник тезисов. СПб., 2012. С. 36.
5. *Anikevich A.S.* On the spectrum of Y-type chain of weakly coupled conglobated resonators // Mathematical Challenge of Quantum Transport in Nanosystems: Book of Abstracts of the International Conference (Saint Petersburg, March 12–15, 2013). 2013. P. 8.
6. *Аникевич А.С.* Отрицательные собственные значения оператора Лапласа для цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов с Y-разветвлением [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2013. С. 209–210. URL: http://kmu.ifmo.ru/file/stat/12/v_tez_2_2013.pdf (дата обращения: 10.06.2015).
7. *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.
8. *Anikevich A.S.* Negative eigenvalues of the Y-type chain of weakly coupled ball resonators [Electronic resource] // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2013. Vol. 4. No 4. P. 545–549. URL: <http://nanojournal.ifmo.ru/en/articles-2/volume4/4-4/young-researches-symposium/paper12/> (accessed: 10.06.2015).
9. *Anikevich A.S.* Negative eigenvalues of Laplacian for the Y-bent chain of weakly coupled conglobated resonators // Days on Diffraction 2013: International Conference. Saint Petersburg, May 27–31, 2013. Abstracts. 2013. P. 17.
10. *Мелихова А.С.* О спектре цепочек слабо связанных шарообразных резонаторов // Труды студенческого центра прикладных математических исследований. СПб., 2013. Т. 3. С. 70–79.
11. *Мелихова А.С.* Спектральная задача для Y-разветвленной цепочки слабо связанных шарообразных резонаторов // XVIII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов: Сборник тезисов. СПб., 2013. С. 39.
12. *Мелихова А.С.* Построение математической модели и ее спектральный анализ для изогнутой и разветвленной цепочек нанорезонаторов // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 290.
13. *Melikhova A.S.* Spectral bands for chain of ball resonators with Dirichlet condition // Days on Diffraction 2014: International Conference. Saint Petersburg, May 26–30, 2014. Abstracts. 2014. P. 65–66.

Литература

1. *Wang C., Shim M.* Electrochromic nanocrystal quantum dots // Science. 2001. Vol. 291. No 5512. P. 2390–2392.

2. Rech J., Matveev K.A. Electronic transport in inhomogeneous quantum wires // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. Vol. 20. No 16. P. 164211.
3. Warner J.H., Schaffel F., Bachmatiuk A., Rummeli M.H. Fundamentals and emergent applications. New York, 2012. – 366 p.
4. Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Avouris P. Carbon nanotubes: Synthesis, structure, properties, and applications. 2001. – 448 p.
5. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Фуллерены и структуры углерода // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 9. С. 977–1009.
6. 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.
7. Duclos P., Exner P., Turek O. On the spectrum of a bent chain graph // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 2008. Vol. 41. No 41. P. 415206.
8. 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. 3974–3801.
9. Pavlov B.S. The theory of extensions and explicitly-soluble models // Russian Mathematical Surveys. 1987. Vol. 42. No 6. P. 127–168.
10. Albeverio S., Gesztesy F., Hoegh-Krohn R., Holden H. Solvable models in quantum mechanics. 1988. – 452 p.



Пастухов Артем Сергеевич
Факультет пищевой инженерии и автоматизации
Кафедра автоматизации биотехнологических и теплофизических процессов
E-mail: artem.pastukhov1984@gmail.com

АНАЛИЗ АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПОТОКЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.С. Пастухов

Научный руководитель – доцент В.Б. Данин

Задача обеспечения микробиологической безопасности хлеба во время его хранения и реализации в торговой сети решается путем упаковывания его в пленку. С таким товаром также удобнее работать с точки зрения маркетинга. В свою очередь, упаковка в пленку возможна лишь при достаточно низкой температуре продукта. Если упаковывать изделия в горячем виде, то внутри ее неизбежно скапливается влага, что приводит к намоканию корки, ускоренному развитию плесени и потере товарного вида хлебной продукции.

Различают два периода усыхания хлебобулочных изделий. В первом периоде оно наибольшее и намного ниже во втором; поэтому основным путем снижения потерь при усыхании хлеба является сокращение длительности первого периода. Добиться этого можно путем ускорения охлаждения хлеба после выхода из печи до температуры воздуха в хлебохранилище. С другой стороны, чрезмерная интенсификация процесса охлаждения приводит к увеличению скорости испарения влаги из продукта, в то время как его усушка строго нормирована [1].

В данном проекте рассматривается процесс охлаждения хлебобулочных изделий, осуществляемый на спиральном конвейере, и разработка системы автоматизации этого процесса. Одним из преимуществ спиральных конвейерных систем по сравнению

тоннельными установками или остывочными камерами является то, что им требуются меньшие площади для охлаждения такого же количества продукции.

О достоинствах применения установок на основе спиральных конвейерных систем говорится уже более пяти лет. Тем не менее в настоящее время проблема использования этих устройств для снижения продолжительности процесса охлаждения и усушки хлебобулочных изделий в научной среде остается актуальной. В литературных источниках можно найти сравнительные характеристики различных способов охлаждения и хранения хлебобулочной продукции. Однако при приведении численных, а не относительных значений продолжительностей процессов охлаждения изделий с применением как «кулеров», так и традиционных тоннельных схем не берутся во внимание аппаратурно-технологические параметры охлаждения, такие как температура, влажность и скорость обдувающего продукт воздуха, скорость движения конвейерной ленты, а также теплофизические свойства и масса охлаждаемого продукта. Не менее важно учитывать и форму изделий. Разные виды хлебобулочных изделий имеют разные теплофизические свойства, форму, массу, следовательно, для достижения одной и той же температуры внутри мякиша требуют разных параметров охлаждения. При автоматизации процесса посредством «кулеров» возникает необходимость разработки комплексной системы управления, позволяющей оптимизировать параметры технологического процесса при возникновении различных производственных ситуаций, которые могут произойти на хлебопекарном предприятии.

Основные достигнутые результаты

В Табл. 1 представлены результаты анализа технической документации на оборудование спирального конвейера, а также анализ производственных ситуаций, присущих данному процессу и тех, которые могут возникнуть на предприятии. Цель проведенного анализа заключается в определении номинальных значений и диапазонов варьирования основных возмущающих и управляющих воздействий. В результате исследования было также установлено влияние каждого воздействия на выходные параметры.

Анализ проводился с использованием технической и технологической документации, а также результатов экспериментов, проведенных в разное время на спиральном конвейере.

Таблица 1

Диапазоны варьирования управляющих воздействий

Факторы процесса охлаждения хлебобулочных изделий (каналы управления)		Единицы измерения	Ориентировочное среднее (номинальное значение)	Технологический интервал отклонений от среднего значения	
				от	до
Управляющие	Температура воздуха	°С	22	-2,0	+4,0
	Скорость воздуха	м/с	0,5	-0,5	+2,5
	Относительная влажность воздуха	%	50	-10	+10

В результате анализа установлено, что температура обдувающего изделие воздуха оказывает определенное влияние на скорость охлаждения (время достижения температуры 30 °С в центре мякиша изделия) (рис. 1).

Увеличение температуры обдувающего продукт воздуха на 4 °С приводит к увеличению времени, необходимого для достижения температуры в 30 °С в центре мякиша на 26 % , а понижение ее на 7 °С приводит к сокращению требуемого времени на 24 % (Табл. 2).

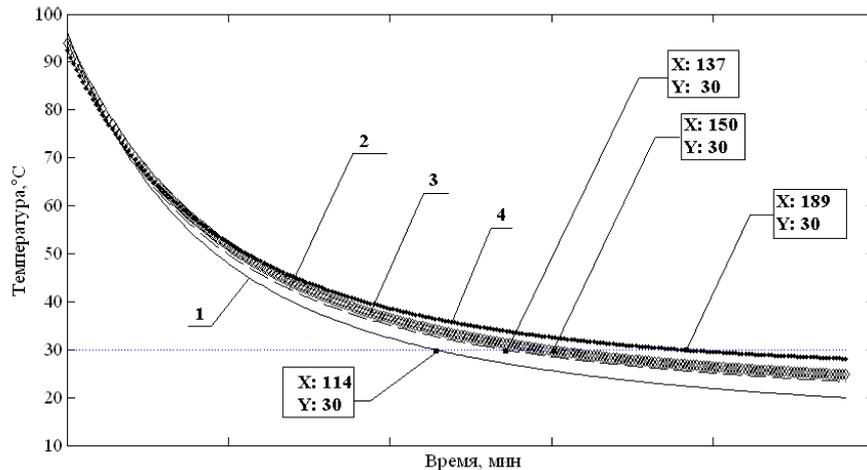


Рис. 1. Графики температуры в центре буханки во время охлаждения при скорости обдува 0,5 м/с. Температуры обдувающего продукт воздуха: 1 – 15 °C; 2 – 20 °C; 3 – 22 °C; 4 – 26 °C

Таблица 2

Влияние температуры обдувающего продукт воздуха на температуру в центре изделия

Температура воздуха, обдувающего продукт, °C	Время, необходимое для достижения 30 °C в центре мякиша, мин	Время, необходимое для достижения 30 °C в центре мякиша, %
15	114	76
20	137	91
22	150	100
26	189	126

Скорость обдувающего изделие воздуха оказывает значительное влияние на время охлаждения мякиша (рис. 2).

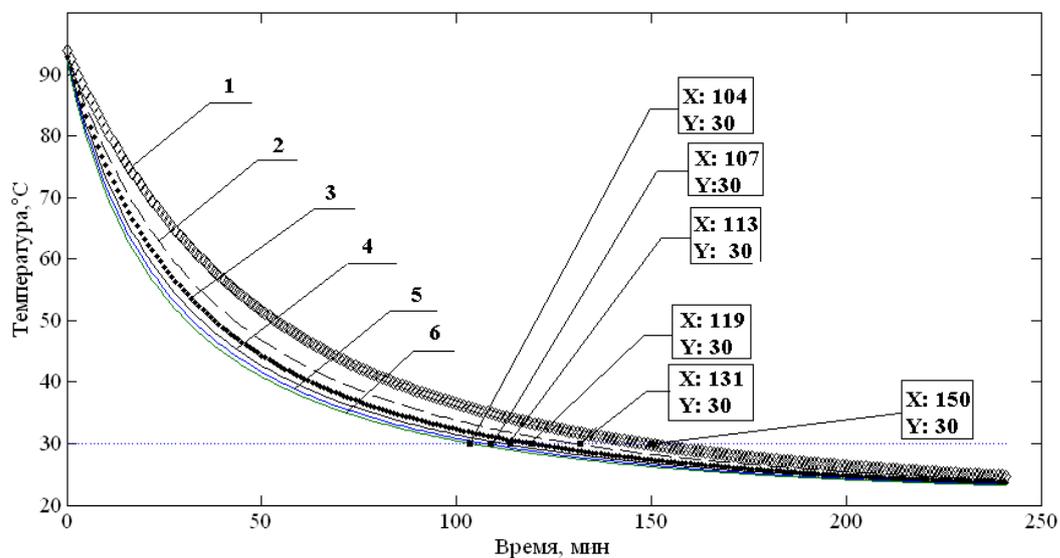


Рис. 2. Графики температуры в центре буханки во время охлаждения при температуре 22 °C. Скорости обдувающего продукт воздуха: 1 – 0,5 м/с; 2 – 1 м/с; 3 – 1,5 м/с; 4 – 2 м/с; 5 – 2,5 м/с; 6 – 3 м/с

Так при увеличении скорости воздуха на 0,5 м/с, уменьшается время достижения 30 °C в центре мякиша на 13%, а увеличение скорости воздуха на 2,5 м/с уменьшает время охлаждения на 31 % (Табл. 3).

Таблица 3

Влияние скорости обдувающего продукт воздуха на температуру в центре изделия

Скорость воздуха, обдувающего продукт, м/с	Время, необходимое для достижения 30 °С в центре мякиша, мин	Время, необходимое для достижения 30 °С в центре мякиша, %
0,5	150	100
1	131	87
1,5	119	79
2	113	75
2,5	107	71
3	104	69

Анализ представленных выше данных показывает, что при управлении конвейерной установкой охлаждения хлебобулочных изделий имеются широкие возможности компенсации влияния на конечный продукт отклонений неуправляемых внешних, внутренних и параметрических возмущений изменением управляющих воздействий в диапазонах, представленных в Табл. 1. Эту задачу может выполнить контур регулирования «по отклонению», в котором измеренные первичным преобразователем отклонения температуры от номинального значения устраняются регулятором, воздействующим по одному из каналов управления.

Проведенный анализ также показал, что наибольшее влияние на величину выходного параметра (температуру охлажденного продукта) оказывают температура и скорость обдувающего продукт воздуха. Поэтому в разрабатываемой системе именно они выбраны в качестве каналов управления. В структуре системы управления аппаратурно-технологическим комплексом охлаждения хлебобулочных изделий снижение времени запаздывания может быть обеспечено введением оперативного предвычисления изменения поверхности изделия, поступающего на охлаждение, и, соответственно, внесение коррекции в систему управления.

Повышение регулирующего воздействия при отклонении температуры поверхности готового продукта может быть обеспечено суммарным воздействием каналов управления, формирующих параметр температуры поверхности изделия. Для организации структуры такой многоканальной системы управления необходимо провести оценку уровней влияния на параметр температуры поверхности в виде безразмерных коэффициентов формирования температуры поверхности хлебобулочных изделий ($K_{фт}$):

$$K_{фт} = \frac{\Delta W / W_n}{\Delta S / S_n},$$

где ΔW – изменение значения температуры поверхности готового продукта, вызванное изменением возмущающего фактора, %; W_n – номинальное значение температуры поверхности готового продукта, %; ΔS – изменение значения фактора формирования параметра температуры; S_n – номинальное (технологическое) значение фактора формирования параметра температуры.

Однако необходимо отметить, что контур регулирования температуры конечного продукта по отклонению может оказаться неэффективным при переходе на охлаждение другого вида хлебобулочного изделия с существенно отличающимися теплофизическими свойствами и формой. Поэтому в разрабатываемой системе автоматизации предусматривается возможность установки параметров процесса с учетом теплофизических свойств и формы изделий, поступивших на охлаждение.

Система автоматического контроля и регулирования процесса охлаждения основывается на том, что текущее значение регулируемых параметров в блоке рассогласования сравнивается с заданными значениями соответствующих параметров.

Формируются сигналы рассогласования, которые усиливаются до значений, достаточных для срабатывания исполнительных механизмов, обеспечивающих работу регулирующих органов. Научная новизна заключается в вычислении заданных значений параметров охлаждения, которые выполняются при помощи вычислительной системы, основанной на экспериментальных исследованиях и математическом моделировании.

Применение программно-логического контроллера в качестве управляющего устройства позволяет создать систему управления любой сложности [2]. Практически все производители контроллеров и комплексов программирования предоставляют разработчику библиотеку регуляторов, в которую традиционно входит наиболее эффективный и распространенный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор, обеспечивающий достаточно высокую точность при управлении различными процессами. На российском рынке средств автоматизации особой популярностью пользуются недорогие, но очень функциональные и надежные программируемые логические контроллеры производства компании ОВЕН. Они программируются в соответствии со стандартом МЭК 61131, в среде программирования CoDeSys [3].

Заключение

В ходе проведенного исследования выполнен анализ аппаратурно-технологических факторов процесса охлаждения хлебобулочных изделий, проведена количественная оценка степени влияния технологических факторов на время достижения 30 °С в центре мякиша охлаждаемого изделия. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования процесса. Построена математическая модель процесса охлаждения. Она показала хорошую сходимость с результатами экспериментов.

Полученные результаты позволили составить алгоритм вычисления значений температуры и скорости обдувающего продукт воздуха, который применяется в работе программируемого логического контроллера системы управления технологическим процессом охлаждения хлебобулочных изделий различного ассортимента.

Публикации

1. Пастухов А.С., Богатырев А.В., Данин В.Б., Балюбаи В.А. Анализ аппаратурно-технологических факторов процесса охлаждения хлебобулочных изделий [Электронный ресурс] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 3 (21). С. 205–216. URL: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10454.pdf> (дата обращения: 19.05.2015).
2. Данин В.Б., Пастухов А.С. Поступление хлебобулочных изделий на участок охлаждения. Оптимизация на основе модели системы массового обслуживания // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 61–63.
3. Pastukhov A. Automatic control and maintaining of cooling process of bakery products // Agronomy Research. 2015. Vol. 4. No. 13. pp. 1031–1039.

Литература

1. Пастухов А.С., Данин В.Б. Общие сведения об охлаждении хлеба // Известия СПбГУНиПТ. 2007. № 1. С. 37–41.
2. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты. М., 2003. – 256 с.
3. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys V2.3. Смоленск, 2004. – 423 с.



Петрова Ирина Анатольевна
Факультет информационных технологий и программирования
Кафедра компьютерных технологий
E-mail: irenepetrova@yandex.com

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ ПОМОЩИ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЕ

И.А. Петрова

Научный руководитель – профессор А.А. Шалыто

Введение

Существуют методы повышения эффективности эволюционных алгоритмов при помощи вспомогательных критериев [1, 2]. В одном из них целевой критерий разбивается на несколько вспомогательных, которые оптимизируются одновременно [1]. В этом подходе вспомогательные критерии должны быть независимы, однако это не всегда возможно. В другом методе вводятся вспомогательные критерии, которые оптимизируются вместе с целевым. Этот подход был успешно применен для решения задачи составления расписаний и задачи коммивояжера [2]. Однако оптимизировать все вспомогательные критерии неэффективно [3]. Поэтому на каждом шаге алгоритма выбирается один или несколько оптимизируемых критериев.

Существуют различные методы выбора вспомогательного критерия. Оптимизируемый критерий может выбираться случайным образом [2] или при помощи некоторой эвристики [4]. Первый метод может быть применен для решения любой задачи с конечным набором вспомогательных критериев, но при этом не учитывает специфику задачи, а второй может быть применен для решения лишь конкретной задачи.

Метод EA+RL не имеет этих недостатков [3]. В нем для выбора вспомогательного критерия, используемого в качестве функции приспособленности (ФП) на данном шаге алгоритма, применяется обучение с подкреплением [5]. В этом случае агент обучения применяет действие к среде, в результате чего среда переходит в новое состояние и возвращает агенту численную награду. В методе EA+RL эволюционный алгоритм (ЭА) выступает в роли среды обучения, а действием является выбор ФП. Стоит отметить, что задача оптимизации вспомогательных ФП не ставится, они используются лишь для более быстрой оптимизации целевой ФП.

Цель обучения с подкреплением – максимизация суммарной награды. В методе EA+RL в качестве награды выбирается разность значений целевой функции на лучшей особи в текущем и предыдущем поколениях ЭА. Суммарная награда примерно равна разности между конечным и начальным значением целевой ФП. Поэтому при максимизации суммарной награды также максимизируется и значение целевой функции, и нет необходимости явно оптимизировать целевую функцию при помощи ЭА. Таким образом, на каждом шаге при помощи ЭА оптимизируется только вспомогательный критерий. Поэтому можно использовать однокритериальный ЭА, который работает быстрее, чем многокритериальный.

Схема метода EA+RL представлена на рис. 1, где t – номер итерации алгоритма. Эффективность данного метода была продемонстрирована и теоретически доказана на ряде задач [3, 6]. Предполагалось, что среда стационарна, и поэтому применялись алгоритмы обучения в стационарной среде, например Q -обучение. Среда является стационарной, если полученная награда зависит только от состояния среды и примененного действия. Но

в случае когда свойства вспомогательных критериев зависят от этапа оптимизации, награда, полученная в результате применения одного и того же действия в одном и том же состоянии, может быть разной. Поэтому эффективнее использовать обучение с подкреплением в нестационарной среде.



Рис. 1. Схема метода EA+RL

Целью проекта является разработка метода, предназначенного для повышения эффективности эволюционных алгоритмов при помощи метода EA+RL в нестационарной среде. Основная задача, решаемая в проекте, – разработка нового подхода к обучению с подкреплением в нестационарной среде.

Предлагаемый подход

Существуют различные методы обучения с подкреплением в нестационарной среде [7]. Одним из наиболее эффективных, который может быть применен к выбору вспомогательных критериев, является алгоритм RLCD [8]. Однако результаты его применения для решения описанной ниже задачи оказались хуже, чем результаты, полученные с помощью методов, применявшихся ранее. Поэтому был предложен новый метод обучения с подкреплением в нестационарной среде.

В ходе предварительных экспериментов было получено, что лучшие результаты получаются при применении Q -обучения. Поэтому именно он используется в новом подходе. Так же, как в алгоритме Q -обучения, на каждой итерации агент применяет действие a к среде, находящейся в состоянии s . Затем значение ожидаемой награды $Q(s, a)$ обновляется в соответствии с полученной наградой. Главной идеей алгоритма является перезапуск обучения при условии, что $|Q(s, a) - Q(s', a')| < \delta$ для какой-то пары (s, a) и (s', a') . Перезапуск обучения связан с тем, что в описанном случае ожидаемая награда примерно одинакова для хотя бы одной пары действий и агент не может определить, какое из них более эффективно. Поэтому обучение стало неэффективным и потребовался перезапуск. Предполагается, что такая ситуация возникает при изменении свойств вспомогательных критериев. Предлагаемый подход был апробирован на ряде конфигураций модельной задачи. Результаты, полученные при применении нового подхода, превосходят результаты существующих алгоритмов.

Улучшенная версия предлагаемого подхода

В ходе выполнения проекта была разработана улучшенная версия предлагаемого подхода. Улучшение заключается в изменении условий для перезапуска Q -обучения. В листинге 1 приведен псевдокод улучшенной версии, в которой есть два условия для перезапуска обучения. Первое условие выполнено, если награда меньше или равна нулю в течение нескольких последовательных итераций и в c_1 из этих итераций награда строго меньше нуля, где c_1 – некоторая константа. Второе условие работает в случае, когда значение ФП может не изменяться на протяжении нескольких итераций. Условие выполнено если награда меньше или равна нулю в течение нескольких последовательных итераций и в c_2 из этих итераций награда равна нулю, где c_2 – некоторая константа. В этом случае перезапуск

происходит с вероятностью $\frac{\text{optimal}-\text{current}}{\text{optimal}}$, где *optimal* это максимальное значение целевой ФП, а *current* – значение целевой ФП на данной итерации.

Предполагается, что выполнение первого условия означает изменение свойств вспомогательных критериев. Выполнение второго условия отражает остановку ЭА в локальном оптимуме. Стоит отметить, что в конце процесса оптимизации для нахождения лучшего решения требуется большее число итераций. Поэтому для предотвращения частого перезапуска *Q*-обучения в конце процесса оптимизации вероятность перезапуска уменьшается со временем.

1. Сформировать начальное поколение G_0
2. Инициализировать $Q(s, a) \leftarrow 0$ для каждого состояния s и действия a
3. Инициализировать счетчик числа итераций: $k \leftarrow 0$
4. Инициализировать первый счетчик для перезапуска: $reset_1 \leftarrow 0$
5. Инициализировать второй счетчик для перезапуска: $reset_2 \leftarrow 0$
6. Пока (не достигнуто заданное число итераций или максимальное значение целевой ФП)
7. Вычислить текущее состояние s_k и передать его агенту
8. Выбрать действие $a: Q(s, a) = \max_{a'} Q(s, a')$
9. Сгенерировать следующее поколение G_{k+1}
10. Вычислить полученную награду r
11. $Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(s, a') - Q(s, a))$
12. Инициализировать переменную для перезапуска: $reset \leftarrow false$
13. Если награда меньше нуля: $r < 0$
14. Увеличить на один первый счетчик для перезапуска: $reset_1 \leftarrow reset_1 + 1$
15. Если награда равна нулю: $r = 0$
16. Увеличить на один второй счетчик для перезапуска: $reset_2 \leftarrow reset_2 + 1$
17. Если награда больше нуля: $r > 0$
18. Обнулить первый счетчик для перезапуска: $reset_1 \leftarrow 0$
19. Обнулить второй счетчик для перезапуска: $reset_2 \leftarrow 0$
20. Если первое условие выполнено: $reset_1 = c_1$
21. $reset \leftarrow true$
22. Если второе условие выполнено: $reset_2 = c_2$
23. Обнулить второй счетчик для перезапуска: $reset_2 \leftarrow 0$
24. Сгенерировать случайное число n от 0 до 1
25. Если $n \leq \frac{\text{optimal}-\text{current}}{\text{optimal}}$
26. $reset \leftarrow true$
27. Если необходим перезапуск обучения: $reset = true$
28. $Q(s, a) \leftarrow 0$ для каждого состояния s и действия a
29. Обнулить первый счетчик для перезапуска: $reset_1 \leftarrow 0$
30. Обнулить второй счетчик для перезапуска: $reset_2 \leftarrow 0$

Листинг 1. Улучшенная версия предложенного подхода

Модельная задача

Улучшенная версия предложенного алгоритма была протестирована на более сложной модельной задаче, чем та, на которой был протестирован предложенный подход. Рассматривалась модельная задача с двумя вспомогательными критериями, которые могут быть как эффективными, так и неэффективными на разных этапах оптимизации. В этой задаче особи представляются битовыми строками длины n . Пусть x – число бит, равных

единице. Целевая ФП задается формулой: $g(x) = \lfloor \frac{x}{k} \rfloor$, где k – константа, $k < n$. Необходимо максимизировать значение целевой ФП. Вспомогательные ФП имеют следующий вид:

$$h_1 = \begin{cases} x, & x \leq p_1, \\ p_1, & p_1 < x \leq p_2, \\ x, & p_2 < x \leq p_3, \\ p_3, & p_3 < x \leq p_4, \\ \dots & \dots \\ x, & p_s < x \leq n. \end{cases} \quad h_2 = \begin{cases} p_1, & x \leq p_1, \\ x, & p_1 < x \leq p_2, \\ p_3, & p_2 < x \leq p_3, \\ x, & p_3 < x \leq p_4, \\ \dots & \dots \\ n, & p_s < x \leq n. \end{cases}$$

В точках p_i вспомогательные ФП меняют свои свойства, будем называть их точками переключения. Вспомогательная и целевая ФП представлены на рис. 2. Вспомогательный критерий h_1 эффективен, когда $x \in [0, p_1], (p_2, p_3) \dots (p_s, n]$, а h_2 эффективен во всех остальных случаях. Вспомогательный критерий h_1 может быть отрицательным на интервале $[2p_{k-1}, p_k)$, если $p_k - p_{k-1} > p_{k-1}$. В связи с требованиями используемой библиотеки, значения ФП должны быть неотрицательными, поэтому было применено следующее преобразование: $h_i(x) \leftarrow h_i(x) + p_k - 2p_{k-1} = -x + 2p_{k-1} + p_k - 2p_{k-1} = -x + p_k$.

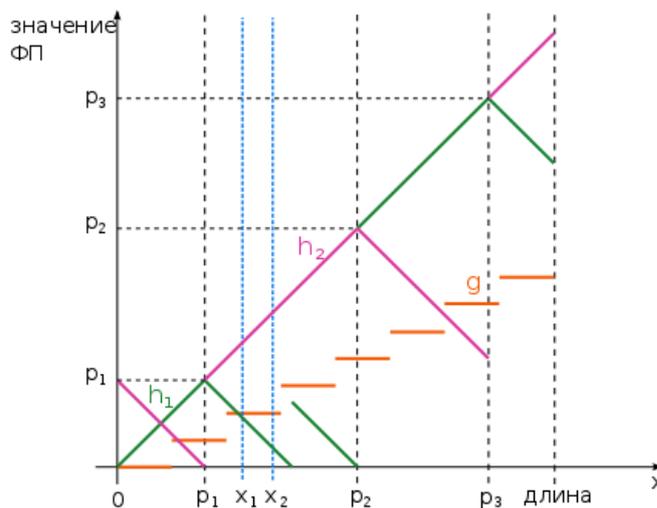


Рис. 2. Модельная задача

Так же, как и при решении предыдущей задачи, в идеальном случае на каждой итерации в качестве оптимизируемого критерия должен быть выбран тот вспомогательный критерий, который не является константой на текущем интервале значений x . Основное отличие данной модельной задачи от предыдущей заключается в том, что в случае выбора неэффективной вспомогательной ФП, значение целевой ФП может уменьшиться. Поэтому эта задача труднее, чем предыдущая.

Результаты

Полученные средние значения целевой ФП представлены в Табл. 1 в виде выражения $\frac{\text{optimal-average}}{\text{optimal}} \cdot 100\%$, где *optimal* – максимальное значение целевой ФП, *average* – среднее. В первой колонке указана длина особи, в остальных пяти – средние значения целевой ФП, полученные при использовании улучшенной версии предложенного подхода, ϵ -жадного Q -обучения, отложенного Q -обучения и RLCD соответственно. Среднеквадратичное отклонение при использовании отложенного Q -обучения составило около 10 %, а при использовании остальных алгоритмов – около 0,5 %. Для всех рассмотренных конфигураций модельной задачи результаты, полученные при использовании улучшенной версии предложенного подхода, превосходят результаты остальных алгоритмов.

Значения p-value, полученные при сравнении улучшенной версии предложенного подхода с другими алгоритмами, приведены в скобках в соответствующих колонках. P-value, полученные при сравнении улучшенной версии предложенного подхода с предложенным подходом, отложенным Q -обучением и RLCD, меньше уровня статистической значимости, что говорит о различимости этих подходов. Можно видеть, что в случаях, когда длина особи превышала 1000, новый подход статистически отличим от ε -жадного Q -обучения, так как полученные при сравнении данных подходов p-value меньше уровня статистической значимости.

Таблица 1

Средние значения целевой ФП

Длина особи	Улучшенная версия	Предложенный подход	ε -жадное Q -обучение	Отложенное Q -обучение	RLCD
750	0,56	1,60 ($2,2 \times 10^{-16}$)	0,64 ($2,2 \times 10^{-1}$)	11,43 ($2,2 \times 10^{-16}$)	5,23 ($2,2 \times 10^{-16}$)
1000	0,39	1,16 ($2,2 \times 10^{-16}$)	0,49 ($2,2 \times 10^{-2}$)	4,23 ($3,6 \times 10^{-16}$)	4,33 ($2,2 \times 10^{-16}$)
1250	0,34	1,02 ($2,2 \times 10^{-16}$)	1,44 ($2,2 \times 10^{-16}$)	15,28 ($2,2 \times 10^{-16}$)	4,76 ($2,2 \times 10^{-16}$)
1500	0,17	0,87 ($2,2 \times 10^{-16}$)	1,83 ($2,2 \times 10^{-16}$)	12,01 ($2,2 \times 10^{-16}$)	11,98 ($2,2 \times 10^{-16}$)
1750	0,27	1,14 ($2,2 \times 10^{-16}$)	1,97 ($2,2 \times 10^{-16}$)	16,56 ($2,2 \times 10^{-16}$)	8,37 ($2,2 \times 10^{-16}$)
2000	0,78	1,55 ($2,2 \times 10^{-16}$)	2,00 ($2,2 \times 10^{-16}$)	14,54 ($2,2 \times 10^{-16}$)	6,92 ($2,2 \times 10^{-16}$)
2250	1,07	1,59 ($2,2 \times 10^{-13}$)	1,98 ($2,2 \times 10^{-16}$)	21,91 ($2,2 \times 10^{-16}$)	15,39 ($2,2 \times 10^{-16}$)
2500	1,18	1,73 ($2,2 \times 10^{-16}$)	1,88 ($2,2 \times 10^{-16}$)	8,79 ($2,2 \times 10^{-16}$)	16,05 ($2,2 \times 10^{-16}$)
2750	1,35	1,68 ($2,2 \times 10^{-12}$)	1,96 ($2,2 \times 10^{-16}$)	12,32 ($2,2 \times 10^{-16}$)	8,34 ($2,2 \times 10^{-16}$)
3000	1,40	1,62 ($2,2 \times 10^{-11}$)	3,09 ($2,2 \times 10^{-16}$)	16,08 ($2,2 \times 10^{-16}$)	11,04 ($2,2 \times 10^{-16}$)
3250	1,45	1,52 ($2,2 \times 10^{-5}$)	3,70 ($2,2 \times 10^{-16}$)	5,37 ($2,2 \times 10^{-16}$)	18,06 ($2,2 \times 10^{-16}$)
3500	1,34	1,49 ($2,2 \times 10^{-7}$)	3,97 ($2,2 \times 10^{-16}$)	10,33 ($2,2 \times 10^{-16}$)	12,79 ($2,2 \times 10^{-16}$)
3750	1,32	2,03 ($2,2 \times 10^{-16}$)	4,13 ($2,2 \times 10^{-16}$)	13,31 ($2,2 \times 10^{-16}$)	20,01 ($2,2 \times 10^{-16}$)

Таблица 2

Число запусков, в которых было достигнуто оптимальное значение целевой ФП

Длина	Улучшенная версия	Предложенный подход	ε -жадное Q -обучение	Отложенное Q -обучение	RLCD
750	58	4	52	12	0
1000	61	0	51	15	0
1250	65	0	20	5	0
1500	76	0	0	0	0
1750	60	0	0	0	0
2000	60	0	0	0	0
2250	12	0	0	0	0
2500	2	0	0	0	0
2750	0	0	0	0	0

Число запусков, в которых анализируемые алгоритмы достигли оптимального значения целевой ФП, приведены в Табл. 2. В первой колонке указана длина особи, в остальных пяти – число запусков, в которых был достигнут оптимум при использовании улучшенной версии предложенного подхода, предложенного подхода, ε -жадного Q -обучения, отложенного Q -обучения и RLCD соответственно. В случаях, когда длина особи была меньше 2750, результаты, полученные при применении улучшенной версии предложенного подхода, превосходят результаты, полученные при использовании остальных алгоритмов. На других конфигурациях модельной задачи при использовании ни одного алгоритма не было достигнуто оптимальное значение целевой ФП.

Заключение

В работе были исследованы существующие методы обучения с подкреплением в нестационарной среде. Один из наиболее эффективных методов, который может быть применен к выбору вспомогательных критериев, был адаптирован для применения в методе EA+RL. Однако он оказался неэффективным. Поэтому был разработан новый подход к обучению с подкреплением, применимый в случае нестационарности, заключающийся в изменении свойств вспомогательных критериев. Предлагаемый подход был успешно применен для решения модельной задачи. В ходе исследований также была разработана улучшенная версия предложенного подхода, которую протестировали на более сложной модельной задаче. Для проверки статистической различимости нового подхода с существующими алгоритмами был проведен тест Уилкоксона. Результаты, полученные при применении улучшенной версии предложенного подхода, превосходят результаты работы предложенного подхода, ε -жадного Q -обучения, отложенного Q -обучения и RLCD.

Публикации

1. Petrova I.A., Buzdalova A.S., Buzdalov M.V. Selection of extra objectives using reinforcement learning in non-stationary environment: initial explorations // Proceedings of 20th International Conference on Soft Computing MENDEL 2014. 2014. P. 105–110.
2. Petrova I.A., Buzdalova A.S., Buzdalov M.V. Improved selection of auxiliary objectives using reinforcement learning in non-stationary environment // 2014 13th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA). 2014. P. 580–583.

Литература

1. Knowles J.D., Watson R.A., Corne D. Reducing local optima in single-objective problems by multi-objectivization // Evolutionary Multi-Criterion Optimization: First International Conference, EMO 2001. Zurich, Switzerland, March 7–9, 2001. Proceedings. 2001. P. 269–283.
2. Jensen M. T. Helper-objectives: using multi-objective evolutionary algorithms for single-objective optimization // Journal of Mathematical Modelling and Algorithms. 2004. Vol. 3. No 4. P. 323–347.
3. Afanasyeva A.S., Buzdalov M.V. Optimization with auxiliary criteria using evolutionary algorithms and reinforcement learning // Proceedings of 18th International Conference on Soft Computing MENDEL 2012. 2012. P. 58–63.
4. Lochtefeld D.F., Ciarallo F.W. Deterministic helper-objective sequences applied to job-shop scheduling // Proceedings of the 12th Conference on Genetic and Evolutionary Computation GECCO'10. 2010. P. 431–438.
5. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement learning: An Introduction. Cambridge, MA, 1998. – 380 p.
6. Buzdalov M.V., Buzdalova A.S., Petrova I.A. Generation of tests for programming challenge tasks using multi-objective optimization // Proceedings of the 15th Conference on Genetic and Evolutionary Computation GECCO'13. 2013. P.1655–1658.

7. *Granmo O.-C., Berg S.* Solving non-stationary bandit problems by random sampling from sibling Kalman Filters // Trends in Applied Intelligent Systems: 23rd International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2010, Cordoba, Spain, June 1–4, 2010. Proceedings. Part III. 2010. P. 199–208.
8. *da Silva B.C., Basso E.W., Bazzan A.L.C., Engel P.M.* Dealing with non-stationary environments using context detection // Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning ICML'06. 2006. P. 217–224.



Пихуров Дмитрий Витальевич
Факультет инженерно-физический
Кафедра информационных технологий топливно-энергетического комплекса
E-mail: firus07@rambler.ru

ЭПОКСИДНЫЕ КОМПОЗИЦИИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ФУЛЛЕРЕНОМ C₆₀, С ПОВЫШЕННОЙ УДАРОПРОЧНОСТЬЮ

Д.В. Пихуров

Научный руководитель – профессор В.В. Зуев

Введение

Эпоксидные композиции широко применяются как конструкционные материалы при изготовлении широкого круга изделий, от ракетных сопел до теннисных ракеток, в том числе как покрытия микросхем в электронике. Обусловлено это тем, что в эпоксидные композиции могут легко вводиться наполнители, такие как углеродные или стекловолокна, порошки и нанопорошки различных металлов и неметаллических соединений [1]. При этом важнейшей нерешенной проблемой остается присущая эпоксидным композициям хрупкость, что является основным ограничивающим фактором их применения. Решение этой проблемы пытаются найти путем использования наноразмерных наполнителей, таких как углеродные нанотрубки, наноразмерные частицы оксида кремния, дисульфида молибдена, вольфрама и ряда других [2]. Основным недостатком нанонаполнителей остается проблема их распределения в полимерной матрице. Пока свойства композитов остаются далекими от желаемых, и заметного улучшения их механических характеристик удастся добиться лишь при концентрациях нанонаполнителей 10–20 мас.%, как это наблюдается и для макроразмерных наполнителей. Решить подобную проблему можно при использовании в качестве наполнителя фуллерена C₆₀, который способен растворяться в полимерной матрице [3].

Цели работы

Целью настоящей работы является модификация эпоксидных смол фуллерена C₆₀, изучение механических характеристик полученных композиций и выяснение механизмов повышения механических характеристик эпоксидных смол, модифицированных фуллереном C₆₀, на основе данных по диэлектрической спектроскопии и кинетике отверждения.

Экспериментальная часть

Термоактивные композиты готовили на основе эпоксидной композиции: бисглицидиловый эфир бисфенола F (Аралдайт GY285, Metso (Финляндия)) – 50 % по объему и отвердитель аминного типа DEH24 (Dow Chemical) (50 % по объему), в компонентах

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

которой в ультразвуковой ванне растворяли рассчитанное количество фуллеренов (0,01–0,12 мас.% фуллерена C_{60}). После этого полученная композиция заливалась в форму и отверждалась путем термперирования сначала при 50 °С (2 ч), а затем при 160 °С (2 ч). В результате синтезированы компактные образцы полимерных композиций весом 30–50 г. В качестве наполнителей использовали фуллерены C_{60} (чистота 99,9 %) производства ЗАО ИЛИП (Санкт-Петербург). Для измерения диэлектрических показателей смола была отверждена между двумя латунными электродами с фиксированной кварцевыми волокнами толщиной в 100 мкм. Диаметр характеризующего электрода был равен 15 мм.

Модуль Юнга и предел прочности при разрушении σ_n определяли на разрывной машине UTS 10 (UTStestsysteme, Германия) при сжатии. Использовали образцы в виде бруска 6×6×40 мм; интервал нагрузок от 0,001 Н до 10 кН; диапазон скоростей при деформировании образцов – от 1 до 10 мм/мин. Определения ударной вязкости по Шарпи (без надреза) проводили для брусков 4×10×80 мм с энергией маятника 4,0 Дж. Все измерения проводили для серий по восемь образцов, полученных при разных синтезах нанокompозитов.

Температуры стеклования определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе Netzsch DSC 204F1 при скорости нагрева 10 К/мин в интервале температур 293–473 К.

Морфология нанокompозитов была изучена для сколов блочных образцов методом сканирующей электронной микроскопии на приборе Zeiss ULTRApplus FEG-SEM с увеличением $\times 50$ – $\times 2000$.

Диэлектрические спектры записывали на широкополосном диэлектрическом спектрометре RCL WK 4270 производства фирмы Waynekerr (USA). Измерения проводили в вакууме при частоте 1 – 4×10^4 Гц в интервале температур от 173 до 423 К.

Результаты и их обсуждение

Хотя эпоксидные смолы можно сделать значительно более прочными за счет введения каучуковой фазы, увеличение их ударной вязкости неизбежно сопровождается существенной потерей в модуле упругости и пределе текучести [1]. Альтернативный подход связан с введением в эпоксидные смолы жестких термопластичных частиц. Однако упрочнение термопластами эффективно лишь для эпоксидных смол с относительно низкими плотностями сшивки, если с помощью химической связи или смешения получена прочная межфазная граница [1]. Это предопределило выбор в качестве эпоксидной матрицы для модификации смола Аралдайт GY285, обладающую достаточно высокой собственной ударной вязкостью, а фуллерен C_{60} , способный образовывать химические связи с отвердителем, в качестве альтернативы термопластичному модификатору. Авторами был получен набор эпоксидных композиций с введением в матрицу 0,01–0,12 вес.% фуллерена C_{60} . Было проведено исследование термических свойств модифицированных эпоксидных композиций. Результаты ДСК измерений показывают, что температура стеклования (T_g) композиций при всех исследованных концентрациях фуллерена C_{60} не отличается от таковой для исходной эпоксидной смолы (около 396–397 К при первом нагреве и около 403 К при втором) и совпадает с данными производителя для исходной композиции. Таким образом, можно сделать вывод, что введение фуллерена C_{60} в матрицу эпоксидной смолы не влияет на ее термические свойства и не приводит к существенному изменению степени сшивки, так как в противном случае это привело бы к росту температуры стеклования.

Введение 0,01–0,12 вес.% фуллерена C_{60} приводит к росту модуля Юнга и прочности эпоксидных композиций примерно на 10–15 %. Таким образом, модификация эпоксидных композиций фуллереном C_{60} положительно сказывается на их прочностных характеристиках. Более существенно введение фуллерена C_{60} сказывается на вязкоупругих свойствах модифицированных эпоксидных композиций. На рис. 1 представлена зависимость ударной вязкости композиций от степени наполнения фуллереном C_{60} . Представленные данные показывают, что ударная вязкость для композиции с 0,12 вес.% фуллерена C_{60} возрастает почти в три раза по сравнению с исходной (с 38 кДж/м² до 115 кДж/м²).

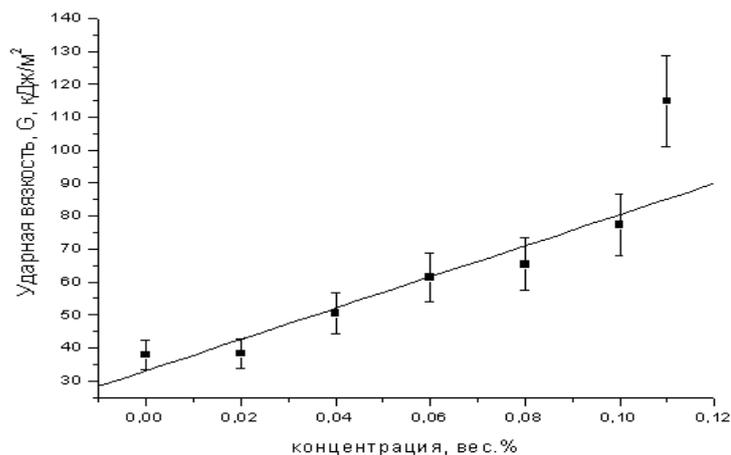


Рис. 1. Зависимость величины ударной вязкости от количества введенного в эпоксидную смолу фуллерена C_{60}

Изменение механизма разрушения эпоксидных композиций при модификации их фуллереном C_{60} показывает изучение сканирующих электронных фотографий поверхностей разрушения после удара. Так, для исходной композиции (рис. 2а) поверхность разрушения показывает обилие шероховатостей, лучей. Формирование их является обычным для эпоксидных композиций, что типично для высокосшитых систем, претерпевающих хрупкое разрушение [4]. Это согласуется с относительно небольшим значением ударной вязкости композиции. Для образца, модифицированного 0,1 вес.% фуллерена C_{60} , картина разрушения меняется (рис. 2б). Поверхность разрушения является гладкой с выраженной вмятиной от удара шарика. Таким образом, введение фуллерена C_{60} существенно меняет механизм разрушения эпоксидной композиции, он переходит от хрупкого к пластическому, что и объясняет значительный рост ударной вязкости.

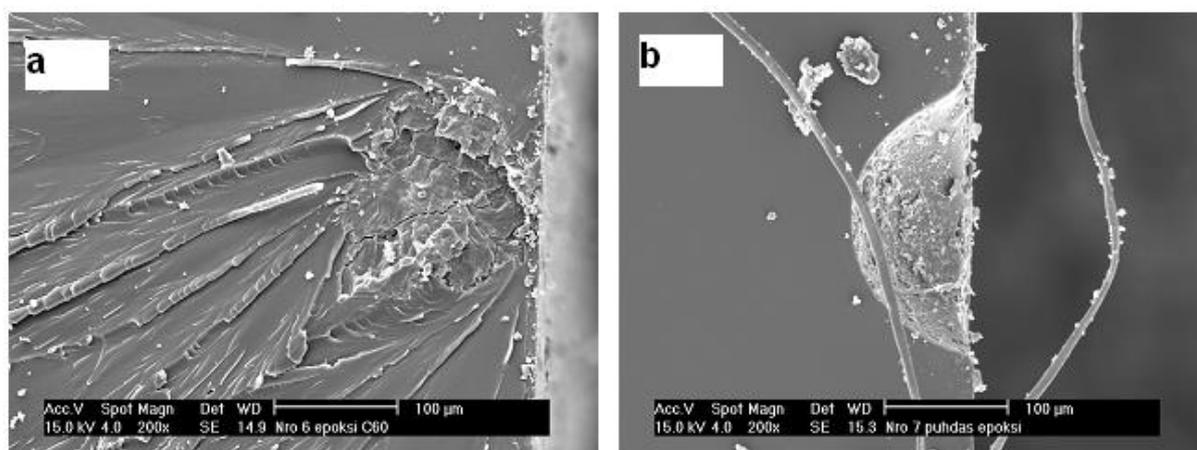


Рис. 2. Фотографии, полученные на сканирующем электронном микроскопе при увеличении $\times 200$: а – поверхность разрушения для исходной эпоксидной смолы; б – смолы, содержащей 0,1 вес.% фуллерена C_{60} (б)

Смена механизма разрушения при введении в эпоксидную смолу фуллерена C_{60} стимулировала нас к выяснению причин этого на молекулярном уровне. Эффективным методом исследования физических процессов в полимерах является диэлектрическая спектроскопия, позволяющая на основании изучения внутримолекулярной подвижности делать выводы о влиянии наполнения полимеров различными частицами на процессы изменения их надмолекулярной структуры и, соответственно, выявлять связи этих процессов с механическими свойствами полимеров. Чтобы представить общую картину диэлектрического поведения нанокмозитов, на рис. 3 показаны температурные

зависимости $tg\delta$ при частотах 0, 7, 3 и 11 кГц для нанокompозита, содержащего 0,02 вес.% фуллерена C_{60} . Картина диэлектрического поведения для чистой эпоксидной смолы и композитов на ее основе схожа. Видно, что по мере возрастания температуры наблюдаются релаксационные процессы, традиционно обозначаемые как β - и α -процессы. Время релаксации $\tau_{\max} = 1/2\pi f_{\max}$ для β - и α -процессов определяли по температуре максимума $tg\delta$ при различных частотах f_{\max} . Зависимости $-\log\tau_{\max} = \varphi(1/T)$ для нанокompозитов представлены на рис. 4.

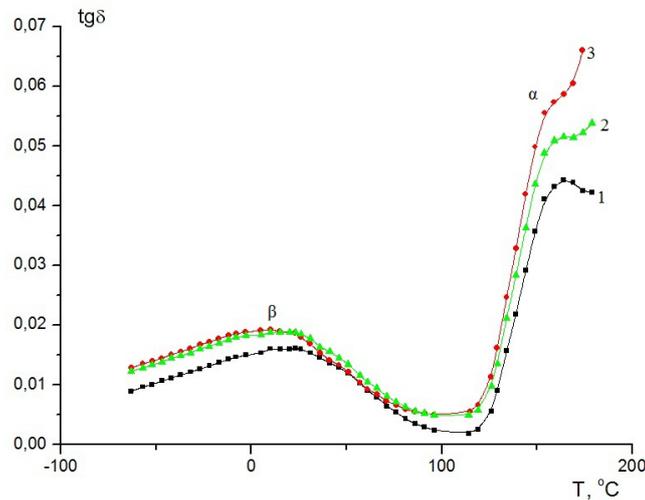


Рис. 3. Температурная зависимость $tg\delta$ для нанокompозита с содержанием фуллерена C_{60} 0,02 вес.% при частотах f_{\max} : 1 – 40 кГц; 2 – 25 кГц и 3 – 3 кГц.
 α – дипольно-сегментальные потери; β – дипольно-групповые потери

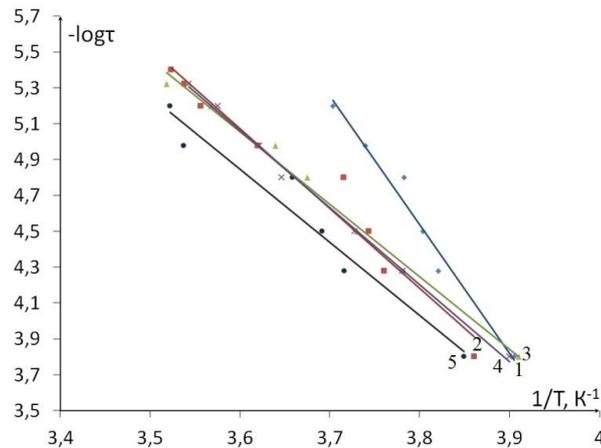


Рис. 4. Зависимость $-\log\tau_{\max}$ от обратной температуры для: 1 – чистой эпоксидной смолы; нанокompозитов с содержанием фуллерена C_{60} : 2 – 0,02; 3 – 0,04; 4 – 0,06 и 5 – 0,08 вес.% в области β -процесса

Введение наночастиц приводит к заметному сдвигу температур максимума β -процесса в сторону более высоких значений. Таким образом, молекулярная подвижность затрудняется при введении молекул фуллерена C_{60} , что связано с сильными межмолекулярными взаимодействиями. Расстояние между шивками в данной эпоксидной смоле составляет 2-3 нм [5], что примерно соответствует размерам молекулы фуллерена. Известно, что ограничение подвижности молекул полимера в межфазной области наполнитель-матрица ведет к росту прочностных характеристик полимерных композитов [1]. Кроме того, в физике полимеров хорошо известно, что смещение максимума β -релаксационного процесса к высоким температурам обеспечивает рост ударной вязкости [6]. Таким образом, данные диэлектрической спектроскопии позволяют на молекулярном уровне объяснить рост механических характеристик эпоксидных композиций, модифицированных фуллереном C_{60} .

Из аррениусовских зависимостей (рис. 4) были определены энергии активации β -релаксационного процесса. При этом наблюдается следующая закономерность – если для исходной эпоксидной смолы она составляет 33 кДж/моль, то для нанокompозитов независимо от концентрации добавки составляет 20–21 кДж/моль. Подобное снижение активационных параметров и ведет к росту пластичности нанокompозитов, так как облегчает рассеивание энергии ударных нагрузок. Как показывает результат, зависимость энергии активации от концентрации наполнителя является нелинейной, что объясняется скачкообразным изменением механизма разрушения эпоксидных смол.

Заключение

Разработан метод модификации эпоксидных композиций, позволяющий при малом уровне введения фуллерена C_{60} (0,02–0,12 мас.%) значительно повысить их механические характеристики: прочность более чем на 20 % и ударную вязкость почти в три раза. Подобный эффект связан с изменением типа разрушения нанокompозитов с хрупкого на пластический. Предложен молекулярный механизм, объясняющий найденные эффекты. Для подтверждения данного механизма необходимо дальнейшее проведение исследований, таких как микроскопия и кинетика отверждения.

Публикации:

1. *Pikhurov D.V., Zuev V.V.* The effect of fullerene C_{60} on the dielectric behaviour of epoxy resin at low nanofiller loading // *Chemical Physics Letters*. 2014. Vol. 601. P. 13–15.
2. *Pikhurov D.V., Zuev V.V.* The effect of fullerene C_{60} on the mechanical and dielectrical behavior of epoxy resins at low loading // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2013. Vol. 4. No 6. P. 834–843.
3. *Пихуров Д.В., Зуев В.В.* Эпоксидные композиции, модифицированные фуллереном C_{60} , с повышенной ударопрочностью // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ бакалавров НИУ ИТМО. СПб., 2013. С. 28–30.
4. *Пихуров Д.В., Зуев В.В.* Эпоксидные композиции, модифицированные фуллереном C_{60} , с повышенной ударопрочностью // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 5 (87). С. 140–143.

Литература

1. *Михайлин Ю.А.* Специальные полимерные композиционные материалы. СПб., 2009. – 660 с.
2. *Hsich T.H., Kinloch A.J., Masania K., Taylor A.C., Sprenger S.* The mechanisms and mechanics of the toughening of epoxy polymer modified with silica nanoparticles // *Polymer*. 2010. Vol. 51. No 26. P. 6284–6294.
3. *Зуев В.В., Пихуров Д.В.* Трибологические свойства полимерных нанокompозитов, модифицированных фуллероидными материалами // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 4 (80). С. 97–100.
4. *Gersappe D.* Molecular mechanisms of failure in polymer nanocomposites // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 89. No 5. P. 058301.
5. *Hsich T.H., Kinloch A.J., Taylor A.C., Kinloch I.A.* The effect of carbon nanotubes on the fracture toughness and fatigue performance of a thermosetting epoxy polymer // *Journal of Materials Science*. 2011. Vol. 46. No 23. P. 7525–7535.
6. *Adachi K., Kotaka T.* Dielectric normal mode relaxation // *Progress in Polymer Science*. 1993. Vol. 18. No 3. P. 585–622.
7. *Adachi K., Kotaka T.* Dielectric normal mode relaxation // *Prog. Polym. Sci.* – 1993. – V. 18. – № 3. – P. 585–622.



Посевкин Руслан Владимирович
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра вычислительной техники
E-mail: rus_posevkin@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕНТИМЕНТ-АНАЛИЗА ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВОГО ТЕКСТА

Р.В. Посевкин

Научный руководитель – доцент И.А. Бессмертный

Цель работы – автоматизация sentiment-анализа естественно-языкового текста.

Проблема управления текстом представляет большой интерес для сфер и институтов общества, оперирующих с текстовыми документами. Особенно это относится к областям образования, журналистики, культуры и издательской деятельности, эффективность которых обусловлена качеством текста, а умения и навыки работы с ним входят в состав профессиональных требований [1].

В последнее время происходит интенсивное развитие сети Интернет. Увеличивается как количество активных пользователей, так и объем генерируемого контента, который появляется в различном виде. Пользователи оставляют сообщения на форуме, создают посты в блогах, комментируют и оставляют отзывы на товары в интернет-магазинах. Наибольшее количество контента генерируется посредством социальных сетей.

Все это содержимое несет в себе большое количество информации, которую возможно использовать. Однако эта информация представлена естественным языком в неструктурированном виде. Структурированная информация может быть получена путем опросов, что влечет за собой увеличение финансовых вложений и количества трудозатрат в целом. Для этого существует отдельное направление, получившее название «обработка естественного языка». Оно относится к компьютерной лингвистике и искусственному интеллекту. Методы обработки естественного языка позволяют извлекать различную информацию из обычного текста на естественном языке. Анализ тональности текста является одним из наиболее перспективных направлений компьютерной лингвистики.

Благодаря анализу тональности текста из текстового материала можно извлекать как эмоционально окрашенную лексику, так и эмоциональное отношение авторов текста по отношению к тем объектам, о которых идет речь [2]. Многие из существующих систем используют бинарную оценку, где существует положительный или отрицательный «sentiment». В то же время ряд систем позволяют определять еще и силу тональности.

В современном мире на принятие решений в той или иной ситуации зачастую влияет мнение других людей. Покупатель изучает отзывы о товаре, прежде чем приобрести его в интернет-магазине, человек также узнает мнение окружающих, прежде чем проголосовать за того или иного кандидата на выборах различного уровня. Аналогичным образом долго и тщательно происходит отбор вуза, места работы и ресторана, который планируется для посещения. Данная информация представляет значительный интерес для маркетологов, социологов и специалистов различных областей.

Более того, для владельцев интернет-сайтов важно знать мнение текущих пользователей. Это может быть мнение относительно сделанного на портале нововведения, свежей новости или оценка покупателем товара в интернет-магазине.

Sentiment-анализ текста является важным этапом извлечения знаний из неформализованных документов, поскольку обеспечивает возможность оценивать степень

доверия к источникам. Таким образом, разработка системы автоматизированной обработки текста на естественном языке является актуальной задачей.

Тональность текста в целом определяется лексической тональностью составляющих его единиц и правилами их сочетания. Субъектом тональности является автор текста, объект тональности – это то, о чем или ком идет речь в тексте.

Существует три основных метода определения тональности текста.

1. Векторный анализ представляет собой сравнение по мере близости с ранее размеченным эталонным корпусом, а также дальнейшую классификацию текста к той или иной оценке на основе сравнения.

2. Поиск лексической тональности по заранее составленным тональным словарям (спискам паттернов) с применением лингвистического анализа.

3. Смешанный метод.

Первый метод требует наличия предварительно размеченного эталонного корпуса, на основе которого происходит обучение алгоритма сравнения. Данный метод не позволяет провести глубокий анализ текста, то есть выявить и показать эмотивность на уровне предложения.

В разработанном программном средстве используется метод, основанный на словарях тональности. Он более гибок и позволяет не только показать цепочки тональной лексики, но и получить синтаксически корректные эмоциональные выражения. При хорошем наполнении тональных словарных списков этот метод позволяет достичь хорошей полноты.

Для автоматического определения тональности текста используется подход на основе правил с использованием шаблонов (rule-based with patterns). Подход заключается в генерации правил, на основе которых будет определяться тональность текста. Для этого текст разбивается на слова или последовательности слов (N-grams). Затем полученные данные используются для выделения часто встречающихся шаблонов, которым присваивается положительная или отрицательная оценка. Выделенные шаблоны применяются при создании правил вида «ЕСЛИ условие, ТО заключение».

В качестве инструмента, применяемого для морфологического анализа и разбора текста, используется программный продукт компании Яндекс «Томита-парсер». Он позволяет по написанным пользователем шаблонам (КС-грамматикам) выделять из текста разбитые на поля цепочки слов или факты. Парсер включает в себя три стандартных лингвистических процессора: токенизатор (разбиение на слова), сегментатор (разбиение на предложения), морфологический анализатор.

Разработанный программный продукт реализует многофазный процесс [3], состоящий из следующих этапов. На первом этапе текст разбивается на отдельные предложения, предложения – на отдельные слова. На втором этапе производятся морфологический анализ каждого слова, лемматизация и определение частей речи, для чего используется «Томита-парсер». Затем слово в исходной форме проверяется по тональному словарю.

Используются тональные словари для русскоязычного текста объемом порядка 35 тысяч слов. Если слово присутствует в словаре, записывается его тональность. В словаре каждому слову соответствует тональная оценка. Такой показатель представляет собой набор из пяти значений, каждое из которых определяет степень принадлежности слова к одному из классов: крайне отрицательный, отрицательный, нейтральный, положительный, крайне положительный. Сумма всех значений для конкретного слова равна единице.

В случае отсутствия в словаре слово считается нейтральным. Последним шагом вычисляется общая тональность предложения на основе тональностей составляющих слов. Для этого применяется метод, основанный на теоретико-графовых моделях. В основе его используется предположение о том, что не все слова в текстовом корпусе документа равнозначны. Какие-то слова имеют больший вес и сильнее влияют на тональность текста. Для получения конечного результата нужно вычислить значения двух оценок: положительной и отрицательной составляющих. Для того чтобы найти положительную

составляющую предложения, необходимо найти сумму тональностей всех положительных компонент слов предложения. Значение отрицательной составляющей текста находится аналогичным образом. Для итоговой оценки тональности всего текста нужно вычислить отношение этих составляющих по выражению:

$$S^* = \frac{\sum_{i=1}^N (S4_i + S5_i)}{\sum_{i=1}^N (S1_i + S2_i)} \quad (1)$$

где S^* – тональная оценка предложения, $S = [S1, S2, S3, S4, S5]$ – тональная оценка слова, $S1, S2$ – отрицательная составляющая тональной оценки слова, $S4, S5$ – положительная, N – количество слов в предложении. Значение S^* сравнивается с некоторым значением T , которое вычисляется экспериментально. Текст, в котором значение S^* близко к значению T , будет считаться нейтральным, если превосходит T – положительным, меньше значения T – отрицательным.

Проведены эксперименты по анализу работоспособности разработанных алгоритмов оценки тональности текста. В качестве условия проведения эксперимента выступают отзывы пользователей электроники и бытовой техники, оставленные в специализированном сервисе «Яндекс.Маркет», и отзывы зрителей, оставленные на кинофильмы в сервисе «Кинопоиск». На данных сервисах пользователь при публикации отзыва определяет тип рецензии: положительная / отрицательная / нейтральная.

Для экспериментов были отобраны 100 предложений. Таким образом, сравнивается sentiment, полученный в результате анализа разработанным программным средством, и sentiment, который определил пользователь при публикации отзыва. На основании полученных результатов всех экспериментов рассчитывается точность определения сентимента:

$$Prec = \frac{N_{Cor}}{N_{All}} \quad (2)$$

где P_{rec} – точность определения тональности текста, N_{cor} – количество экспериментов с верно определенной тональностью предложения, N_{All} – общее количество экспериментов. По результатам экспериментов, точность определения тональности текста разработанного программного продукта составляет 78 %.

Разработанная программная система позволяет производить sentiment-анализ текста на русском языке, представленного в естественном виде. Данная система может применяться в тех областях, где требуется обработать большое количество информации с целью определения мнения объекта о субъекте высказывания. В качестве примера служит область социологии и политологии. Таким образом, с помощью sentiment-анализа отзывов и переписки людей на форумах, станет возможным автоматически оценивать общественное мнение относительно обсуждаемых событий.

Заключение

В ходе данной работы решена задача автоматизации sentiment-анализа естественно-языкового текста на русском языке. Проведен анализ существующих методов обработки естественного языка и определения тональности. Описана процедура получения оценки тональности предложения на основе тональной оценки каждого из слов, входящих в него, с использованием словарей тональности. Разработана программная система sentiment-анализа естественно-языкового текста. Словари тональности представлены в открытом и удобочитаемом виде. Таким образом, появится возможность для расширения и правки уже существующей информации.

Также проведена оценка работоспособности разработанной программы и алгоритма sentiment-анализа текста. По результатам экспериментов, точность определения тональности текста разработанного программного продукта составляет 78 %.

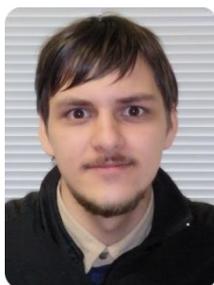
Предложенное решение может быть использовано в тех областях, где требуется обработать большое количество информации с целью определения мнения объекта о субъекте высказывания.

Публикации

1. *Posevkin R.* Sentiment analysis as the method of information extraction // Innovative Information Technologies: Materials of the 3rd International Scientific-Practical Conference. Part 2. Prague, 2014. P. 420–422.
2. *Посевкин Р.В.* Автоматизация сентимент-анализа текста // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ магистров Университета ИТМО. СПб., 2014. С. 127–131.
3. *Посевкин Р.В.* Сентимент-анализ как средство извлечения информации из текста // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 115–117.
4. *Посевкин Р.В.* Автоматизация сентимент-анализа текста // Сборник трудов молодых ученых и сотрудников кафедры ВТ. СПб., 2014. Вып. 5. С. 15–17.
5. *Посевкин Р.В.* Автоматизация классификации тональности текста // Информатика: проблемы, методология, технологии: Материалы XIV Международной конференции. Воронеж, 2014. Т. 3. С. 293–296.
6. *Посевкин Р.В.* Автоматизация анализа тональности текста // Информационное общество: технологии, человек, бизнес: Материалы Международной научно-практической конференции. Пермь, 2013. С. 377–379.

Литература

1. *Бессмертный И.А., Джалиашивили З.О., Максимов В.В., Маркин Д.А.* Лингвооценочное управление текстом [Электронный ресурс] // Материалы X Международной конференции «Применение новых технологий в образовании». Троицк, 1999. URL: <http://www.bytic.ru/cue99M/cx1v6d3gym.html> (дата обращения: 15.11.2014).
2. *Ермаков С.А., Ермакова Л.М.* Методы оценки эмоциональной окраски текста // Вестник Пермского университета. Математика, механика, информатика. 2012. № 1 (9). С. 85–89.
3. *Позельская А.Г., Соловьев А.Н.* Метод определения эмоций в текстах на русском языке // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Международной конференции «Диалог» (Бекасово, 25–29 мая 2011 г.). Вып. 10 (17). М., 2011. С. 510–522.



Савушкин Михаил Александрович
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра оптической физики и современного естествознания
E-mail: savushkinmihail@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ НАНОМЕТРОВЫХ ПЛЕНОК ПОЛИМЕТИНОВОГО КРАСИТЕЛЯ ПРИ ФОТОВОЗБУЖДЕНИИ РАЗНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ФОРМ

М.А. Савушкин

Научный руководитель – доцент А.А. Старовойтов

Цели и задачи работы

Целью данного проекта является экспериментальное исследование влияния резонансного лазерного излучения на различные молекулярные формы в структуре нанометровой пленки полиметинового красителя.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- изучены печатные работы и результаты, опубликованные ранее научной группой;
- проведены исследования в полосе поглощения димеров и *cis*-изомеров.

Проведенные ранее исследования

В научной группе исследовались многокомпонентные слои полиметиновых красителей. В структуре слоя было обнаружено несколько молекулярных форм: *cis*- и *all-trans*-изомеры, а также димеры и J-агрегаты с различными относительными концентрациями и углами ориентации [1–3].

Было установлено, что их спектр поглощения меняется под действием мощного лазерного излучения [2]. Это происходит за счет двух процессов: изменения относительных концентраций молекулярных форм и изменения их углов ориентации. В результате была предложена модель перестройки структуры слоя полиметинового красителя (рис. 1):

- под воздействием света и/или нагрева *all-trans*-изомер стереоизомеризуется (происходит поворот верхней части молекулы относительно одной из связей);
- это ведет к расталкиванию (переориентации) соседних молекул;
- далее происходит возврат образованного стереоизомера в *all-trans*-конфигурацию за счет поворота нижнего фрагмента молекулы.

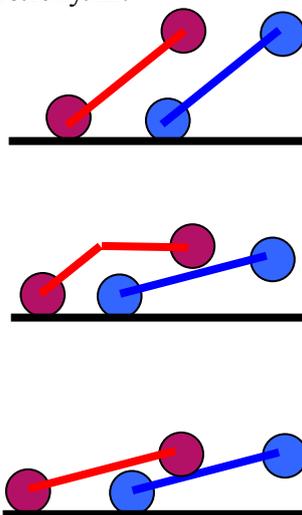


Рис.1. Модель перестройки структуры слоя полиметинового красителя

Объекты исследования

В качестве молекул выбран полиметиновый краситель: 1, 3, 3, 1', 3', 3'-гексаметил-4, 5, 4', 5'-добензоиндадикарбоцианин перхлорат (рис. 2).

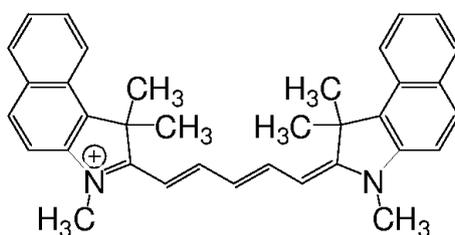


Рис.2. Структура молекулы исследованного полиметинового красителя

Полиметиновые красители являются хорошими модельными объектами, так как их дипольный момент перехода с поглощением совпадает с протяженной цепью сопряжения.

Слои наносились из этанольного раствора красителя на вращающуюся стеклянную подложку методом *spin-coating*, обеспечивающим круговую симметрию пространственного распределения молекул относительно нормали к поверхности.

Затем подложка несколько часов сушилась с целью испарения растворителя.

Методы исследования

Фотоиндуцированная перестройка структуры слоя осуществлялась с помощью излучения лазерной установки (рис. 3), работающей в импульсном режиме с длительностью одного импульса 10 нс (режим модуляции добротности).

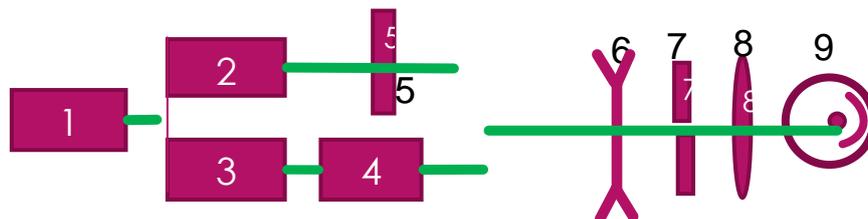


Рис. 3. Схема лазерной установки: 1 – блок с задающим генератором (1064 нм) и кристаллом второй гармоники 532 нм; 2 – дихроичный делитель основной и удвоенной частот; 3 – третья гармоника (355 нм); 4 – параметрический генератор света (560 нм); 5 – нейтральный светофильтр; 6 – цилиндрическая линза; 7 – щель; 8 – образец; 9 – измеритель энергии

Спектры поглощения молекулярного слоя измерялись на спектрофотометре СФ-56. Для выделения спектров поглощения отдельных молекулярных форм из спектра поглощения слоя и определения углов ориентации этих форм использовались оригинальные методики, разработанные в научной группе. Спектры отдельных компонентов были получены из концентрационных серий, а углы ориентации определялись по изучению спектров дихроичного отношения. Подробнее методики выделения из спектров слоя спектров молекулярных форм и их углов ориентации изложены в [4].

Основные достигнутые результаты

Облучение на длине волны 560 нм (максимум поглощения димеров)

Как видно из рис. 4, облучение в максимуме поглощения димера с плотностью энергии до 10 мДж/см² не привело к значительным изменениям спектров поглощения слоя и отдельных компонентов.

Углы ориентации компонентов меняются в пределах точности определения углов – одного градуса (Табл. 1). Средняя энергия в импульсе 7 мДж, причем основные изменения произошли после первого импульса с плотностью энергии 4 мДж/см², дальнейшее облучение (до 300 импульсов с плотностью энергии до 10 мДж/см²) не приводило к заметным изменениям спектров и углов ориентации.

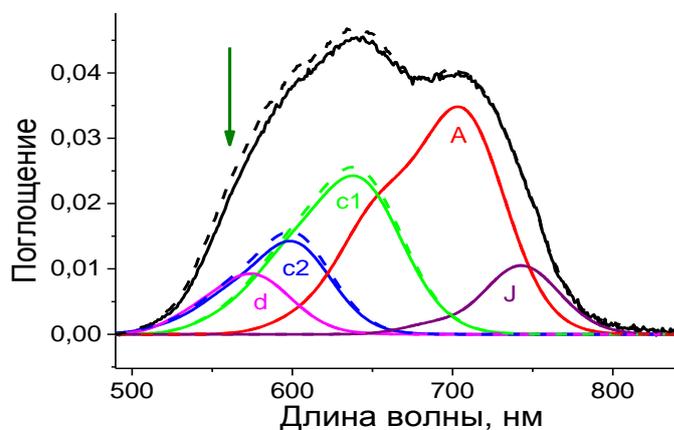


Рис. 4. Изменения спектров поглощения слоя и его компонентов после четырех облучений на длине волны 560 нм (указано стрелкой).

A – all-trans-изомеры, J – J-агрегаты, C1 и C2 – cis-изомеры, d – димеры

Таблица 1

Изменения углов ориентации молекул и агрегатов при облучении на длине волны 560 нм

	До	После
A	56	57
C1	54	55
C2	47	47
d	54	54
J	61	62

Облучение на длине волны 532 нм (поглощение димеров)

Для увеличения плотности энергии облучения пришлось отказаться от длины волны близкой к максимуму поглощения димера (и соответственно блока параметрической генерации света в лазерной системе) и перейти на вторую гармонику лазера (которая имеет большую выходную энергию), продолжив облучение на длине волны 532 нм, которая также возбуждает димеры. Было проведено семь облучений с разными энергиями импульса, что привело к значительным изменениям в спектре поглощения слоя. Димеры были полностью разрушены. Поглощения в области *cis*-изомеров уменьшилось, а в области *all-trans*-изомера и J-агрегата увеличилось (рис. 5).

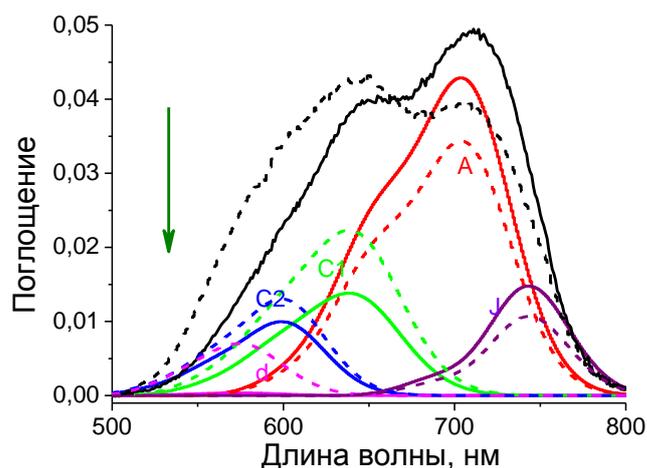


Рис. 5. Изменения в поглощении слоя и его компонентов после облучений на длине волны 532 нм, указанной стрелкой

Из рис. 6 видно, что перестройка молекулярных форм начинается примерно с импульса в 65 мДж/см^2 , до этого углы ориентации практически не меняются. Это значит, что процесс перестройки является активационным и энергия его активации $60 \pm 5 \text{ мДж/см}^2$ для длины волны 532 нм, что соответствует поглощенной плотности энергии в $0,7 \text{ мДж/см}^2$. При последующих облучениях, несмотря на увеличение энергии почти в два раза, углы ориентации меняются значительно меньше. Как видно из рисунка, для всех форм, за исключением димеров, они увеличиваются.

Так как углы ориентации определяются по углам дипольных моментов относительно поверхности, а дипольный момент димера перпендикулярен составляющим его молекулам, то уменьшение угла момента димера говорит об увеличении его угла между образующими его молекулами и нормалью к поверхности.

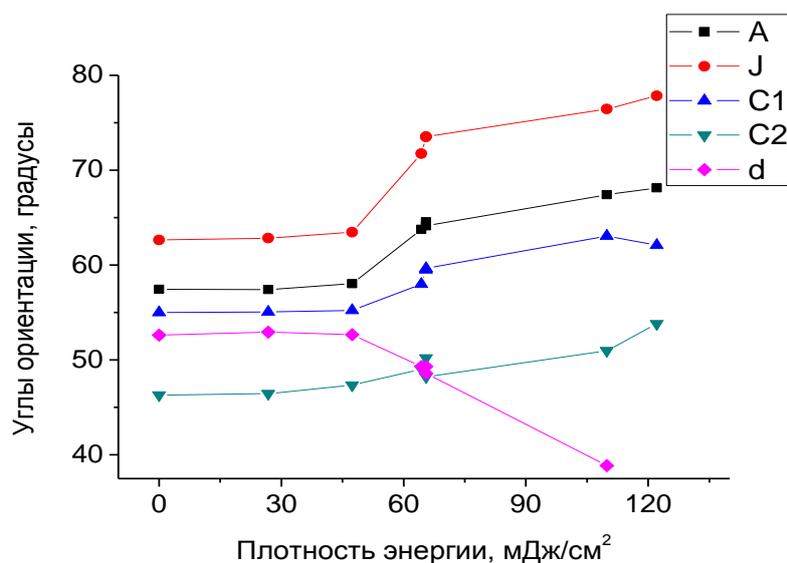


Рис. 6. Графики зависимости изменения углов ориентации молекулярных форм от плотности энергии при облучении на длине волны 532 нм

Облучение на длине волны 600 нм (поглощения *cis*-изомеров)

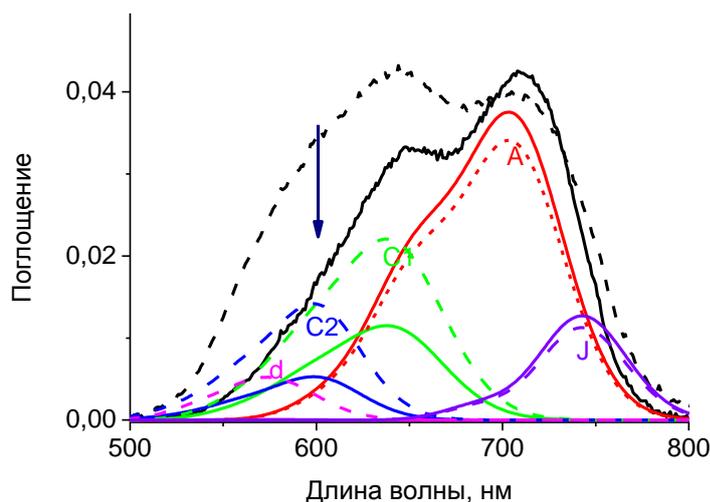


Рис. 7. Изменения в поглощении слоя и его компонентов после облучений на длине волны 600 нм, указанной стрелкой

Из рис. 7 видно, что характер изменения спектров поглощения слоя и молекулярных форм при возбуждении на длине волны 600 нм идентичен возбуждению на длине волны 532 нм. При этом димеры значительно разрушаются.

У всех компонентов, кроме димера, который был разрушен, наблюдается перестройка углов ориентации (рис. 8), значительное изменение угла происходит только у *J*-агрегата.

Выводы

В ходе работы проведено облучение лазерными импульсами слоев полиметинового красителя в полосах поглощения наиболее коротковолновых форм молекул – димеров и *cis*-изомеров. Установлено, что происходит изменение спектров оптической плотности образцов за счет уменьшения поглощения димеров и *cis*-изомеров и увеличения относительных интенсивностей полос *all-trans*-изомеров и *J*-агрегатов. Отмечено, что больший вклад в изменение оптических свойств вносит изменение относительных концентраций компонентов, в то время как углы ориентации меняются мало.

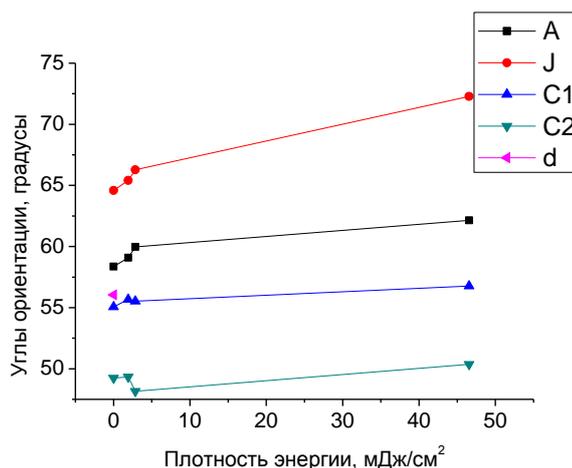


Рис. 8. Зависимости изменения углов ориентации молекулярных форм от плотности энергии при облучении на длине волны 600 нм в области поглощения *cis*-изомеров

Димер в процессе облучения разрушается, что приводит к увеличению концентрации *all-trans*-изомеров и, следовательно, J-агрегатов, образующихся из *all-trans*-изомеров.

Процесс изменения углов ориентации молекулярных форм – активационный: перестройка начинается с энергии облучения примерно 60 мДж на длине волны 532 нм (поглощение димеров). Возбуждение в максимуме поглощения димеров (560 нм) не дало точных результатов в связи с технологическими особенностями лазерной системы, которая не позволяет получить большие выходные энергии на параметрическом генераторе света.

При возбуждении в области поглощения *cis*-изомеров (длина волны 600 нм) в пределах до 45 мДж/см² не было обнаружено значительных изменений углов ориентации молекулярных форм за исключением J-агрегата. Это может говорить о том, что порог перестройки еще не преодолен. Получение больших выходных энергии не возможно для использованной лазерной системы.

Исходя из литературных данных [2], изменение углов ориентации всех молекулярных форм при возбуждении в максимумах поглощения *all-trans*-изомеров или J-агрегатов наблюдалось при плотностях энергии в 30 мДж/см².

Таким образом, можно резюмировать, что были установлены пороги активации при возбуждении всех компонентов. В большей степени они зависят от интенсивности поглощения света в максимуме компонента: чем больше поглощение, тем с меньшей энергией необходимо облучать образец.

Области возможного использования результатов проекта

Молекулярные слои и тонкие пленки органических соединений являются многообещающими средами в связи с различными аспектами их применения. Например, для будущих информационных сетей, обеспечивающих скорость передачи информации порядка 1 Тбит/с, необходимы оптические переключатели с субпикосекундными временами отклика. Такие устройства для демультимплексирования сигналов могут быть созданы на основе тонкой пленки J-агрегатов полиметиновых красителей. Молекулярные слои также применяются в качестве дихроичных цветных светофильтров для жидкокристаллических дисплеев, при создании органических светодиодов OLED-дисплеев, полевых транзисторов, сенсibilизированных солнечных батарей. Тонкие молекулярные слои могут быть использованы и как зонды для исследования свойств поверхности – ее рельефа и наличия заряженных центров. Молекулярные слои полиметиновых красителей нашли применение в качестве фоточувствительных слоев для записи, хранения и считывания информации.

Публикации

Савушкин М.А., Старовойтов А.А. Резонансная фотоиндуцированная перестройка многокомпонентных слоев полиметинового красителя // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 2. СПб., 2014. С. 339–340.

Литература

1. Калитеевская Е.Н., Крутякова В.П., Разумова Т.К., Старовойтов А.А. Механизмы формирования равновесного компонентного состава молекулярных слоев полиметиновых красителей // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. № 3. С. 398–405.
2. Воронин Ю.М., Калитеевская Е.Н., Крутякова В.П., Разумова Т.К., Старовойтов А.А., Щедрин П.В. Изменения равновесного компонентного состава и пространственной ориентации молекулярного слоя полиметиновых красителей // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 8. С. 72–78.
3. Калитеевская Е.Н., Крутякова В.П., Разумова Т.К., Старовойтов А.А. Передача возбуждения между компонентами молекулярных слоев цианиновых соединений // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 112. № 2. С. 231–236.
4. Вартамян Т.А., Калитеевская Е.Н., Леонов Н.Б., Разумова Т.К., Старовойтов А.А., Торопов Н.А., Хромов В.В. Методы измерения оптических свойств наноструктур. СПб., 2011. – 64 с.



Цесь Юлия Владимировна
Естественнонаучный факультет
Кафедра экологического приборостроения и мониторинга
E-mail: julchik-ces@rambler.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД РЫБОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ПОМОЩЬЮ БИОФЛОКУЛЯНТОВ

Ю.В. Цесь

Научный руководитель – доцент М.А. Кустикова

Цели работы – исследование биофлокулирующей способности избыточного активного ила и разработка на его основе биофлокулянтов для очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий. Были поставлены следующие задачи:

- исследовать возможности использования избыточного активного ила в качестве биофлокулянта для очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий;
- провести скрининг методов обработки избыточного активного ила, улучшающих биофлокуляционную способность его микроорганизмов;
- оценить эффективность использования биофлокулянта;
- разработать технологическую схему для очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов на основе избыточного активного ила.

Предметом исследования является процесс очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянта. Объект исследования – технологические сточные воды рыбоперерабатывающего предприятия ООО «Эликом».

В качестве потенциально биоприемлемого флокулянта для их очистки был использован избыточный активный ил сооружений биологической очистки.

Проведенные исследования позволили установить высокую эффективность извлечения ценных компонентов сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий и их очистку с помощью биофлокулянтов на основе избыточного активного ила. Исследования обосновали необходимость предварительной обработки избыточного активного ила ультразвуком в течение 7,5–10 мин. Это позволяет увеличить его флокуляционную активность и тем самым повысить эффективность очистки сточных вод по таким показателям, как взвешенные вещества, биологическое потребление кислорода (БПК₅), химическое потребление кислорода (ХПК), концентрация общего азота, фосфатов, растворенных веществ, жиров. Результаты исследований представлены в Табл. 1.

Таблица 1

Флокулирование загрязнений сточной воды

Показатели	Исходная сточная вода (СВ)	СВ + избыточный активный ил (ИАИ)	СВ + ИАИ + ультразвук 7,5–10 мин	СВ + ИАИ + УЗ 15–20 мин
Взвешенные вещества, мг/дм ³	6400	1400	1000	3193
Эффективность очистки по взвешенным веществам, %		78	84,4	50,1
Концентрация общего азота, мг/дм ³	0,43	0,39	0,22	0,35
Эффективность очистки по содержанию общего азота, %		10,2	48,8	17,9
БПК ₅ , мг/дм ³	160,9	82,1	61,9	94,4
Эффективность очистки по БПК ₅ , %		48,9	61,5	41,3
Сухой остаток, мг/дм ³	2480	640	480	1783
Эффективность очистки по содержанию растворенных веществ, %		74,2	80,6	28,1

На основании проведенного исследования и анализа литературных источников была выбрана схема очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с использованием биофлокулянтов на основе избыточного активного ила, изображенная на рис. 1.

Избыточный активный ил поступает в вертикальный илоуплотнитель для отделения иловой воды и уплотнения осадка. Далее он попадает на блок кавитационной обработки, состоящий из камеры, излучателя УЗ, первичного источника электроэнергии, системы управления частотой и амплитудой импульса, преобразователя напряжения.

Сточная вода и обработанный активный ил подаются в узел реагентной обработки, который представлен отстойником – флокулятором, имеющим смеситель с делителем потока, для эффективного образования флокул достаточного размера. Эффективное перемешивание осуществляется за счет энергии струи воды, подаваемой через сопла.

Производственный сток из смесителя подается в зону флокуляции, представляющую собой двухступенчатую водоворотно-вихревую камеру. Затем, двигаясь сверху вниз, он образует хлопья белково-минеральных загрязнений и поступает в нижнюю часть зоны отстаивания, где происходит осаждение сформированных хлопьев.

Далее очищенная вода движется вверх, отводится через периферийный кольцевой лоток и направляется в систему городской канализации.

Кавитация (от лат. *cavitas* – пустота) – это образование в капельной жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (так называемых кавитационных пузырьков, или каверн). Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического значения $p_{кр}$ (в реальной жидкости $p_{кр}$ приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости при данной температуре). Для создания процесса кавитации при обработке избыточного активного ила наиболее приемлемым методом является воздействие ультразвуком.

Ультразвуковые волны, распространяясь в жидкости, образуют чередующиеся области высоких и низких давлений, создающих зоны высоких сжатий и разрежений. В разреженной зоне гидростатическое давление понижается до такой степени, что силы, действующие на молекулы жидкости, становятся больше сил межмолекулярного сцепления. В результате резкого изменения гидростатического равновесия жидкость «разрывается», образуя многочисленные мельчайшие пузырьки газов и паров. Когда в жидкости наступает период высокого давления, образовавшиеся ранее пузырьки схлопываются. Процесс схлопывания пузырьков сопровождается образованием ударных волн с очень большим местным мгновенным давлением, достигающим нескольких сотен атмосфер. В результате этого хлопка клеточная оболочка активного ила разрушается, что приводит к высвобождению биополимеров, обладающих флокулирующими свойствами.

Для кавитационной обработки избыточного активного ила предлагаем использовать установку, состоящую из камеры кавитационной обработки, излучателя ультразвука, первичного источника электроэнергии, системы управления частотой и амплитудой импульса, преобразователя напряжения.

Заключение

В ходе проведенных исследований было выявлено, что наиболее эффективным биофлокулянт на основе избыточного активного ила для очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий является избыточный активный ил, обработанный ультразвуком в течение 7,5 мин. В результате его применения достигается высокая степень очистки по таким показателям, как взвешенные вещества, сухой остаток, БПК₅, содержание общего азота, что существенно уменьшает негативное воздействие на экосистему Кольского залива.

Разработана технологическая схема очистки сточных вод с помощью биофлокулянтов на основе избыточного активного ила, состоящая из узла уплотнения избыточного активного ила, блока его кавитационной обработки, узлов реагентной обработки и обезвоживания осадка.

В результате применения рыбоперерабатывающим предприятием ООО «Эликом» разработанного метода очистки сточных вод величина предотвращенного экологического ущерба составит 3935795,6 усл.т./год.

Публикации

1. Цесь Ю.В., Васильева Ж.В. Разработка технологии очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2014. № 2 (17). С. 87–92.
2. Цесь Ю.В., Васильева Ж.В., Воронкина Е.Ю., Ляшенко Э.С., Поливцева Е.И. Перспективные направления реагентных методов очистки сточных вод рыбоперерабатывающих производств // Современная наука: реальность и перспективы: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции. Липецк, 2013. С. 103–104.
3. Цесь Ю.В., Ляшенко Э.С., Поливцева Е.И. Модификация биофлокулянта на основе активного ила с целью интенсификации очистки сточных вод // Сборник тезисов студенческой научно-технической конференции – 2012. Т. 1. Мурманск, 2012. С. 220–221.

4. *Цесь Ю.В., Полищева Е.И.* Разработка технологии очистки сточных вод с использованием биофлокулянтов на основе избыточного активного ила // Сборник тезисов студенческой научно-технической конференции – 2013. Т. 1. Мурманск, 2013. С. 159–160.
5. *Цесь Ю.В.* Разработка технологии очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов // Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов, студентов и преподавателей по результатам проведения Пятого молодежного экологического Конгресса «Северная Пальмира». СПб., 2013. С. 100–104.
6. *Цесь Ю.В.* Разработка технологии очистки сточных вод рыбоперерабатывающих предприятий с помощью биофлокулянтов // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції студентів і аспірантів «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень» (14–15 травня 2014 року): у 3 т. Т. 1. Луцьк, 2014. С. 306–309.
7. *Цесь Ю.В.* Использование инструментов наилучших доступных технологий для эффективности очистки сточных вод // Будущее машиностроения России: сборник трудов Седьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М., 2014. С.251–252.

Литература

1. *Гвоздев В.Д.* Очистка производственных сточных вод и утилизация осадков. М., 1988. – 112 с.
2. *Ксенофонтов Б.С.* Интенсификация очистки сточных вод химических производств с использованием биофлокулянтов // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 10. С. 18–20.
3. *Пронина Е.В., Ахмадуллина Ф.Ю., Закиров Р.К., Победимский Д.Г.* Применение низкочастотного ультразвука для повышения ферментативной активности промышленных илов в условиях протока // Химическая промышленность. 2006. № 8. С. 64–71.



Чугина Юлия Владимировна
 Факультет компьютерных технологий и управления
 Кафедра систем управления и информатики
 E-mail: chugina.yulya@mail.ru

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА СИГНАЛ УПРАВЛЕНИЯ

Ю.В. Чугина

Научный руководитель – профессор И.Б. Фуртат

Цель работы – решение проблемы управления динамическими сетями в условиях параметрической неопределенности, внешних ограниченных возмущений и насыщения сигналов управления путем разработки алгоритма управления, позволяющего с требуемой точностью добиться в обозначенных условиях синхронизации сети.

Управление объектами в условиях неопределенности относится к фундаментальным и актуальным проблемам современной теории и практики автоматического управления. Это связано с рядом факторов: отсутствует точное математическое описание объекта управления или происходит изменение его параметров неизвестным образом в широких пределах в процессе функционирования. Усложнение проблемы происходит при рассмотрении динамически связанных объектов, типичной задачей для системы управления которыми является синхронизация их работы. Несмотря на то, что на сегодняшний день предложено

достаточное количество работ, посвященных управлению динамическими сетями [1–3 и другие], немногие из них учитывают наличие ограничений на управляющие сигналы, накладываемые физическими возможностями используемого оборудования. На практике неучтенные ограничения могут привести к ухудшению показателей качества функционирования систем, вплоть до неустойчивости работы [4, 5]. Наиболее часто встречающееся ограничение типа насыщение [6] является негладкой функцией и вносит нелинейность в характер функционирования систем. Немногочисленные известные работы, посвященные компенсации влияния насыщения на этапе аналитического построения системы управления [7–11], не отражают возможности применения приведенных в них алгоритмов к динамически связанным объектам управления.

Настоящая работа опирается на результат, полученный в [12] для управления динамическим объектом с насыщением в канале управления. Предлагаемый алгоритм управления обеспечивает синхронизацию динамических объектов, объединенных в общую сеть, функционирующих в условиях априорной неопределенности параметров, внешних возмущений и ограничений на амплитуду управляющих сигналов. Для иллюстрации работоспособности алгоритма приведен пример его возможного практического применения для управления сетью электрических генераторов, где эффект насыщения может наблюдаться на обмотках возбуждения роторов, используемых для подачи управляющего сигнала.

Постановка задачи. Рассмотрим орграф $\Gamma = (V, E)$, ассоциированный с сетью S , где каждой вершине орграфа Γ соответствует подсистема $S_i, i = \overline{1, k}$, и подсистема лидера S_L , где $V = \{v_1, \dots, v_k\}$ – множество вершин, $E \subseteq V \times V$ – множество ребер. Пусть $C = (c_{ij}), S = (s_{iL})$, – матрицы смежности орграфа Γ такие, что $c_{ij} = 1$ и $s_{iL} = 1$, если $j \in N_i$, иначе $c_{ij} = 0$ и $s_{iL} = 0$, $N_i = \{v_j \in V : (v_i, v_j), (v_i, v_L) \in E\}$ – множество смежных вершин для узла v_i . Запись $(v_i, v_j), (v_i, v_L) \in E$ означает, что информация поступает от подсистемы S_j к подсистеме S_i . и от подсистемы лидера S_L к S_i . Пусть S_i подсистема, соответствующая i -ой вершине орграфа Γ сети S , описывается уравнением:

$$Q_i(p)y_i(t) = R_i(p)g_i(u_i) + \sum_{j=1, i \neq j}^k (Q_{ij}(p)y_j(t) + D_i(p)f_i(t), \quad (1)$$

где $u_i(t) \in R, y_i(t) \in R; f_i(t) \in R, |f_i(t)| \leq \bar{f}_i, \bar{f}_i$ – известна; $Q_i(p), R_i(p), Q_{ij}(p), D_i(p)$ – линейные дифференциальные операторы, коэффициенты которых – неизвестные числа; $\deg Q_i(p) = n, \deg R_i(p) = m; i = \overline{1, k}, k$ – количество подсистем сети; $g_i(u_i) \in R$ – функция насыщения амплитуды сигнала управления $u_i(t)$, которая определена выражением:

$$g_i(u_i) = \begin{cases} u_i(t), u_i(t) \in [\alpha_i; \beta_i] \\ \alpha_i, u_i(t) < \alpha_i \\ \beta_i, u_i(t) > \beta_i \end{cases},$$

Ведущая подсистема S_L , соответствующая L -ой вершине орграфа Γ сети S задается уравнением:

$$Q_L(p)y_L(t) = R_L(p)r(t), \quad (2)$$

где $y_L(t) \in R, r(t) \in R$ – задающее воздействие, причем $|r(t)| \leq \bar{r}, \deg(Q_L(p)) = n - m, \deg(R_L(p)) = 0$. Цель управления состоит в обеспечении синхронизации сети S с заданной точностью

$$|y_i(t) - y_L(t)| < \delta, i = \overline{1, k}, \text{ при } t \geq T, \quad (3)$$

где $\delta > 0$ – заданное число, $T > 0$ – время, по истечении которого должно быть выполнено неравенство (3). Таким образом, в качестве решения поставленной задачи предлагается использовать децентрализованный алгоритм управления, синхронизирующий локально каждую из подсистем с общим для сети эталоном (лидером). Тем самым синхронизируется вся сеть. Поставленная задача решается с учетом ряда предположений.

Предположения

1. Орграф Γ содержит ориентированное остовное дерево, в корне которого находится ведущая подсистема.

2. Подсистемы сети (1) минимально фазовые.

3. Измерению доступны только скалярные выходы локальных подсистем $y_i(t)$.

4. Неизвестные коэффициенты операторов $Q_i(p)$, $R_i(p)$, $Q_{ij}(p)$, $D_i(p)$ принадлежат множеству Ξ , где Ξ – известное ограниченное множество.

5. Выполняются условия: $A_i = A_L + B_L c_{i1}^T$, $B_i = B_L + B_L c_{i2}$, $D_i = B_L c_{i3}$, $D_{ij} = B_L c_{i4}$, где $c_{i1} \in R^n$, $c_{i2} \in R$, $c_{i3} \in R$, $c_{i4} \in R$ – неизвестные вектор и числа, A_i , B_i , D_i , D_{ij} – матрицы i -ой подсистемы, которые можно получить при переходе от (1) к виду

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i g_i(u_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^k (D_{ij} x_j(t)) + D_i f_j(t), \quad x_i(0) = x_0,$$

где A_L , B_L – матрицы подсистемы лидера, которые можно получить при переходе от (2) к виду

$$\dot{x}_L(t) = A_L x_L(t) + B_L r(t), \quad x_L(0) = 0.$$

Алгоритм управления. Рассмотрим систему управлений, состоящую из:

– закона управления $u_i(t)$, ограничивающего функцию управления по амплитуде

$$u_i(t) = \frac{1}{1 + \sigma_i} (u_{ci}(t) + \sigma_i \gamma_i(t)), \quad i = \overline{1, k}, \tag{4}$$

где $\sigma_i > 0$, $\gamma_i(t) = \begin{cases} u_{ci}(t), & u_{ci}(t) \in [\tilde{\alpha}_i; \tilde{\beta}_i] \\ \tilde{\alpha}_i, & u_{ci}(t) < \tilde{\alpha}_i \\ \tilde{\beta}_i, & u_{ci}(t) > \tilde{\beta}_i \end{cases}$, $\tilde{\alpha}_i = \alpha_i + \Delta_i$ и $\tilde{\beta}_i = \beta_i - \Delta_i$, $\Delta_i > 0$ – достаточно малое

число;

– сигнала, компенсирующего возмущения

$$u_{ci}(t) = -\chi_i^{-1} Q_L(p) \bar{\zeta}_i(t), \quad \chi_i > 0, \quad i = \overline{1, k}, \tag{5}$$

где $\bar{\zeta}_i(t)$ – оценка функции рассогласования $\zeta_i(t) = e_i(t) - \bar{e}_i(t)$ i -ой подсистемы, где $e_i(t) = y_i(t) - y_L(t)$ – ошибка слежения;

– вспомогательного контура,

$$Q_L(p) \bar{e}_i(t) = u_{ci}(t), \quad i = \overline{1, k}; \tag{6}$$

– наблюдателя

$$\dot{\xi}_i(t) = G_0 \xi_i(t) + D_0 (\bar{\zeta}_i(t) - \zeta_i(t)), \quad \bar{\zeta}_i(t) = L \xi_i(t), \quad i = \overline{1, k}, \tag{7}$$

где $\xi_i(t) \in R^{n-m}$, $G_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_{n-m-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $D_0 = -[d_1 \mu^{-1}, \dots, d_{n-m} \mu^{-(n-m)}]^T$, коэффициенты d_1, \dots, d_{n-m}

выбираются так, чтобы матрица $G = G_0 - DL$ была гурвицевой, где $D = [d_1, \dots, d_{n-m}]^T$, $L = [1, 0, \dots, 0]$, $\mu > 0$ – достаточно малая величина. Сформируем основной результат.

Утверждение. Пусть выполнены условия Предположений 1–5. Тогда существуют достаточно малая величина $\mu_0 > 0$ и достаточно большие числа $\sigma_i > 0, i = \overline{1, k}$, такие, что при $\mu < \mu_0$ система управления (4–7) обеспечивает выполнение целевого условия (3) и ограничение всех сигналов в системе.

Пример. Рассмотрим задачу синхронизации работы сети электрических генераторов, описываемых математической моделью из работы [13], с поправкой на нестационарность механической мощности. Целевое условие зададим в виде:

$$|\delta_i(t) - \delta_s(t)| < \kappa, \text{ при } t \geq T, i = \overline{1, k}, \quad (8)$$

где $\kappa > 0$ – точность регулирования в установившемся режиме, $T > 0$ – время, по истечении которого с начала работы системы должно выполняться целевое условие. Используемый сигнал управления должен находиться в заданном интервале ограничения по амплитуде. Рассмотрим модель сети из четырех электрических генераторов и источника эталонного сигнала, задающего значение эталона фазы $\delta_s(t) = 0$ (рис. 1).

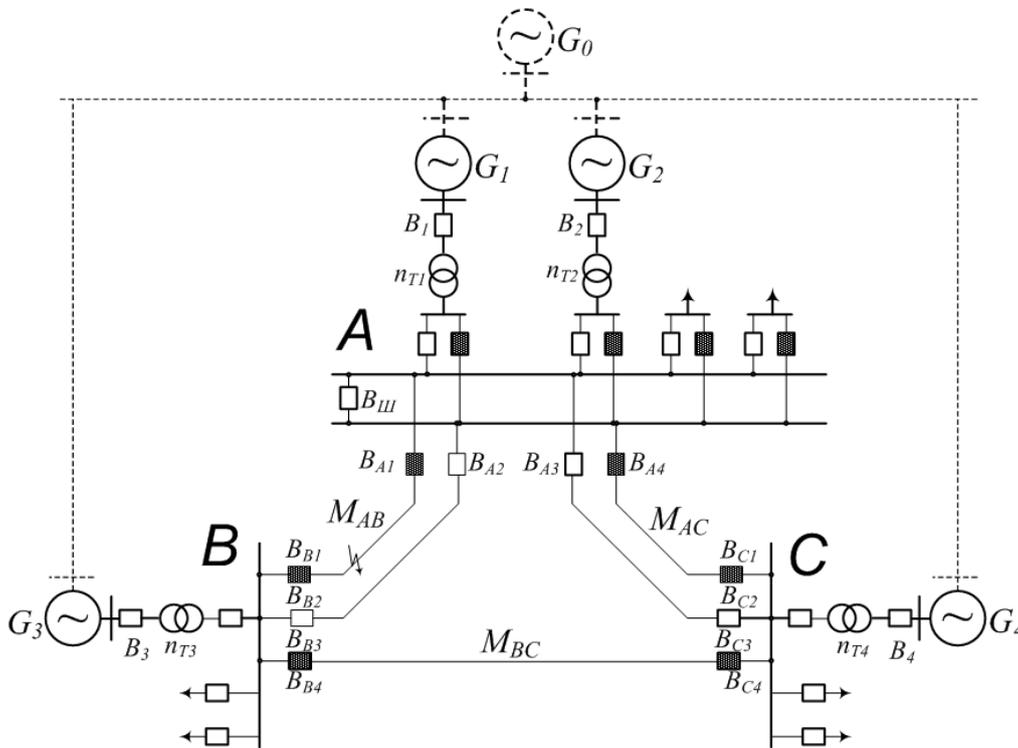


Рис. 1. Однолинейная схема электрической сети: А, В, С – подстанции; G_0 – источник сигнала с эталонной фазой; G_i – электрические генераторы; B_{Ai}, B_{Bi}, B_{Ci} – выключатели линий передачи, B_i – выключатели фидеров генераторов; $B_{ш}$ – разъединитель двойной шины; n_{Ti} – коэффициенты трансформации трансформаторов; M_{AB}, M_{AC}, M_{BC} – проводимости линий передачи; $i = \overline{1, \dots, 4}$

Класс неопределенности Ξ зададим в виде [13]: $6 \leq T'_{doi} \leq 8; 3 \leq D_i \leq 5; 4 \leq H_i \leq 5.5, 1 \leq k_{ci} \leq 3; 1,8 \leq x_{di} \leq 2,4; 0,2 \leq x'_{di} \leq 0,4; i = \overline{1, 4}$. Выберем для каждого из генераторов следующие параметры (см. таблицу): $\omega_0 = 314,159$ рад/с; $\delta_i(0) = 0$ рад; $\omega_i(0) = 0$ рад/с; $\Delta P_{ei}(0) = 0$ относительные единицы (о. е.), $k_{ci} = 1$ о. е.

Поскольку рассматривается сеть из приблизительно одинаковых генераторов, зададим одинаковые требуемые ограничения на амплитуды управляющих сигналов $0 \leq u_{fi} \leq 9$ о. е., и параметры системы управления $\sigma_i = 10^{10}, \chi_i = 5, i = \overline{1, 4}$ и $\mu = 0,005$.

Таблица
 Параметры генераторов

Генератор	D_i , о. е.	H_i , с	T'_{doi} , с	x_{di} , о. е.	x'_{di} , о. е.	P_{m0i} , о. е.	n_{Ti}
G_1	4	5	2	2,17	0,32	$0,9+0,1\sin(t)$	0,64
G_2	4,1	5,1	2,2	2,01	0,28	$1+0,1\sin(t)$	0,65
G_3	4,5	5,2	2,1	2,07	0,35	$0,85+0,1\sin(t)$	0,74
G_4	4,7	4,5	1,9	2	0,3	$0,89+0,1\sin(t)$	0,76

Тогда система управления рассматриваемой модели сети будет задаваться уравнениями:

- функции, ограничивающей амплитуду управляющего напряжения:

$$u_{fi}(t) = \frac{1}{1+10^{10}} (u_{ci}(t) + 10^{10} \gamma_i(t)), \gamma_i(t) = \begin{cases} u_{ci}(t), u_{ci}(t) \in [0.1; 8.9] \\ 0.1, u_{ci}(t) < 0.1 \\ 8.9, u_{ci}(t) > 8.9 \end{cases}, i = \overline{1, 4}$$

- вспомогательного контура:

$$(p^3 + 3p^2 + 3p + 1) \bar{e}_i(t) = -5u_{ci}(t), i = \overline{1, 4};$$

- функций ошибки и рассогласования:

$$e_i(t) = \delta_i(t) - \delta_s(t), \zeta_i(t) = e_i(t) - \bar{e}_i(t), i = \overline{1, 4};$$

- наблюдателя:

$$\dot{\xi}_{2i}(t) = \xi_{2i}(t) - 3 \cdot 200 (\xi_{1i}(t) - \zeta_i(t)), \dot{\xi}_{1i}(t) = \xi_{3i}(t) - 3 \cdot 200^2 (\xi_{1i}(t) - \zeta_i(t)),$$

$$\dot{\xi}_{3i}(t) = -200^3 (\xi_{1i}(t) - \zeta_i(t)), \xi_{1i}(t) = \xi_{2i}(t) = \xi_{3i}(t) = 0, i = \overline{1, 4};$$

- сигнала для компенсации возмущений:

$$u_{ci}(t) = \dot{\xi}_{3i}(t) + 3\xi_{3i}(t) + 3\xi_{2i}(t) + \xi_{1i}(t), i = \overline{1, 4}.$$

При моделировании рассмотрим внезапное изменение проводимости M_{AB} , которое может быть вызвано, например, трехфазным коротким замыканием на линии передачи между подстанциями А и В, до момента времени $t = 2$ с $M_{AB} = 0,08$ о. е., при $t = 2$ с $M_{AB} = 0,8$ о. е, затем в $t = 2,3$ с линия передачи отключается автоматическими выключателями B_{A1} и B_{B1} и до восстановления сети по резервной линии передачи в момент времени $t = 4$ с $M_{AB} = 0$ о. е, после чего $M_{AB} = 0,8$ о. е.

На рис. 2 приведены переходные процессы по относительным углам поворота роторов $\delta_i(t)$, относительным угловым скоростям $\omega_i(t)$, напряжениям на зажимах статора $V_{ii}(t)$ и напряжениям на обмотке возбуждения $u_{fi}(t)$.

Результаты моделирования демонстрируют, что предложенная система управления в условиях ограниченности амплитуды управляющих функций $u_{fi}(t)$, $i = \overline{1, 4}$ обеспечивает с определенной точностью для каждого из генераторов уравнивание угла поворота ротора $\delta_i(t)$ с фазой эталонного сигнала $\delta_s(t)$. Это позволяет обеспечить быструю и точную синхронизацию сети и поддерживать синхронность работы генераторов в случае возможных колебаний сопротивлений на линиях передач. Получить требуемую k в целевом условии (8) можно путем подбора переменных системы управления μ и χ .

Заключение

Синтезирован децентрализованный алгоритм управления, обеспечивающий с требуемой точностью синхронизацию динамической сети в условиях наличия в системе параметрической неопределенности, внешних возмущений, насыщения каналов управления

и недоступности для измерения полного вектора состояния объектов управления. Алгоритм формирует сигнал управления, не выходящий за заданные ограничения по амплитуде, и обеспечивающий при этом компенсацию погрешности, вызываемой возмущениями и неопределённостью параметров. Для компенсации неопределённостей используется метод вспомогательного контура [14].

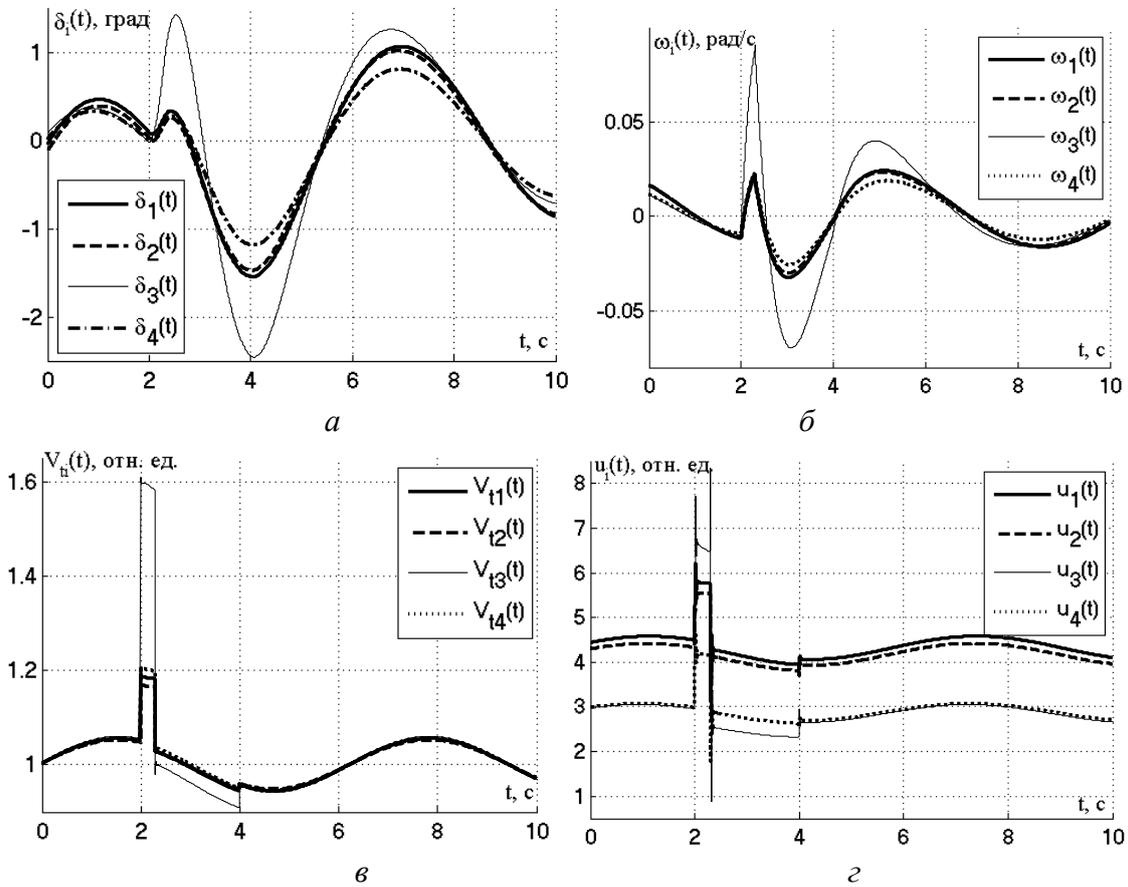


Рис. 2. Переходные процессы по: а – $\delta_i(t)$; б – $\omega_i(t)$; в – $V_{ii}(t)$; г – $u_{fi}(t)$

Приведен пример возможного практического применения алгоритма для синхронизации сети электрических генераторов с учетом эффекта насыщения на обмотках возбуждения роторов. Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что система управления обеспечивает согласованность работы сети в условиях ограниченности управляющих функций.

Публикации

1. Чугина Ю.В. Управление электроэнергетической сетью в условии нестационарности механической мощности // Материалы XVI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб., 2014. С. 110.
2. Чугина Ю.В. Компенсация возмущений в задаче управления электроэнергетической сетью // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Вып. 1. СПб., 2014. С. 288–289.
3. Chugina J.V. Control system for multi-machine power system with disturbances // Тезисы докладов Шестой традиционной всероссийской молодежной летней школы «Управление, информация и оптимизация», VI ТМШ (Григорчиково). М., 2014. С. 54–55.

Литература

1. Scardovi L., Sepulchre R. Synchronization in networks of identical linear systems // Automatica. 2009. Vol. 45. No 11. P. 2557–2562.

2. *Dib W., Ortega R., Hill D.* Transient stability enhancement of multi-machine power systems: synchronization via immersion of pendular system // *Asian Journal of Control*. 2014. Vol. 16. No 1. P. 50–58.
3. *Фуртат И.Б.* Робастная синхронизация динамической сети с компенсацией возмущений // *Автоматика и телемеханика*. 2011. № 12. С. 104–114.
4. *Dornheim M.* Report pinpoints factors leading to YF-22 crash // *Aviation Week and Space Technology*. 1992. Vol. 137. No 19. P. 53–54.
5. *Shifrin C.* Sweden seeks cause of Gripen crash // *Aviation Week and Space Technology*. 1993. Vol. 139. No 7. P. 78–79.
6. *Bezzaoucha S., Marx B., Maquin D., Ragot J.* Contribution to the constrained output feedback control // *2013 American Control Conference (ACC)*. 2013. P. 235–240.
7. *Monopoli R.* Adaptive control for systems for hard saturation // *1975 IEEE Conference on Decision and Control including the 14th Symposium on Adaptive Processes*. 1975. P. 841–843.
8. *Wen C., Zhou J., Liu Z., Su H.* Robust adaptive control of uncertain nonlinear systems in the presence of input saturation and external disturbance // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2011. Vol. 56. No 7. P. 1672–1678.
9. *Schwager M., Annaswamy A.M.* Direct adaptive control of multi-input plants with magnitude saturation constrains // *44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC–ECC'05*. 2005. P. 783–788.
10. *Yan J., Santos D. A., Bernstein D.* Adaptive control with convex saturation constraints // *ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference*. 2013. Vol. 1. P. V001T02A002.
11. *Леонов Г.А., Андриевский Б.Р., Кузнецов Н.В., Погромский А.Ю.* Управление летательными аппаратами с АW-коррекцией // *Дифференциальные уравнения и процессы управления*. 2012. № 3. С. 1–36.
12. *Фуртат И.Б.* Управление объектами в условиях неопределенности и ограничений на амплитуду входного сигнала // *Известия вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57. № 1. С. 20–26.
13. *Gordon M., Hill D.J.* Global transient stability and voltage regulation for multimachine power systems // *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008. P. 1–8.
14. *Цыкунов А.М.* Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // *Автоматика и Телемеханика*. 2007. № 7. С. 103–115.



Шаповал Екатерина Сергеевна
Факультет инженерно-физический
Кафедра информационных технологий топливно-энергетического
комплекса
E-mail: katenka-shapoval@yandex.ru

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ И МЕДИ КАК НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ

Е.С. Шаповал

Научный руководитель – профессор В.В. Зуев

Целью настоящей работы является создание полимерного конструкционного материала, который сочетает в себе такие свойства, как гибкость, легкая перерабатываемость, прозрачность и при этом восприимчив к электромагнитным

воздействиям. Для этого необходимо синтезировать наполнитель для добавления его в матрицу полимера.

Ранее были получены полимерные композиты на основе полиамида 12 (ПА-12) с добавлением наноразмерного никеля и меди. Экспериментальная часть состояла из трех этапов.

1. Создание наноразмерных добавок.
2. Синтез нанокомпозитов на основе ПА-12, усиленных полученными нанодобавками.
3. Снятие механических характеристик с образцов.

Получение наноразмерного порошка никеля

В качестве метода синтеза наночастиц никеля использовали восстановление 0,02N раствора хлорида никеля (II) эквивалентным раствором борогидрида натрия в присутствии олеиновой кислоты как сурфактанта при температуре 60 °С. Основная реакция: восстановление хлорида никеля (II) борогидридом натрия:



Согласно методу в водный раствор хлорида никеля (NiCl₂) добавляли олеиновую кислоту (C₁₈H₃₄O₂) и интенсивно перемешивали в течение 30 мин при температуре 60 °С. После чего по каплям добавляли раствор борогидрида натрия (NaBH₄). Никель выпадал в виде темного осадка, при этом цвет раствора меняется со светло-зеленого на черный [1].

На рис. 1 представлена установка для пиролиза наночастиц. Она состоит из кварцевой трубки, на которую намотана проволока; амперметра, который позволяет регулировать силу тока, а следовательно, и температуру. К трубке через тонкий резиновый шнур подается инертный газ аргон. После нескольких испытаний шнур с правой стороны приобрел желтовато-коричневую окраску: это говорит о том, что в процессе прокаливания с образцов удаляются побочные продукты.

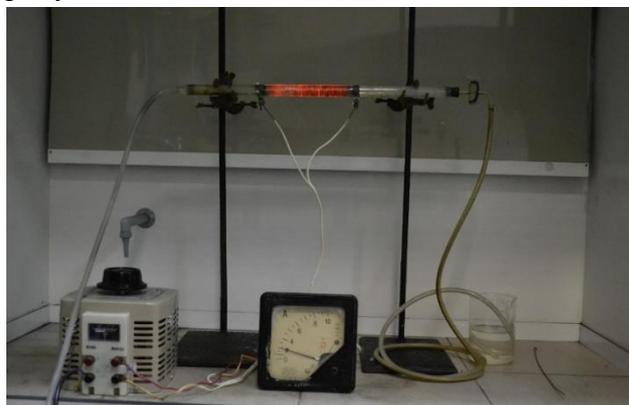


Рис. 1. Установка для пиролиза наночастиц никеля

Получение наноразмерного порошка меди

В качестве метода синтеза наночастиц меди использовали восстановление 0,01M раствора хлорида меди в щелочной среде (раствор аммиака) эквивалентным раствором борогидрида натрия [2]. Основная реакция:



Реакцию проводили при комнатной температуре. Аммиачный раствор хлорида меди имел ярко-синий цвет. При добавлении борогидрида натрия цвет раствора менялся с синего на черный. Далее полученный осадок промывали дистиллированной водой и подвергали сушке при 70 °С. Продукт был охарактеризован данными элементного анализа и электронной микроскопии.

Синтез полимерных нанокомпозитов на основе ПА-12 никеля и меди

Полимерные нанокомпозиты получали методом полимеризации *in situ* то есть путем полимеризации лауролактама в присутствии стеариновой кислоты в качестве пластификатора, фосфорной кислоты как катализатора и частиц никеля и меди, предварительно диспергированных в реакционной среде. Реакция проходит при температуре 300 °С в течении 10 ч. Было сделано несколько образцов с разной концентрацией наночастиц (от 0,1 до 1 мас.%) [3].

Проведение механических испытаний

Модуль Юнга и предел прочности определяли на разрывной машине UTS 10 (UTStestsysteme, Германия). Согласно ГОСТ 4651-82 «Пластмассы. Методы испытания на сжатие» были изготовлены образцы цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 20 мм. Сжатие проводилось в интервале нагрузок от 0,1 Н до 20 кН при скорости сжатия 1мм/мин. Все измерения проводились для серии не менее чем из пяти образцов, полученных при разных синтезах нанокомпозитов.

Результаты и их обсуждение

Результаты синтеза наноразмерных частиц никеля. Наиболее доступным методом синтеза нанодисперсных порошков металлического никеля является восстановление водных растворов солей никеля борогидридом натрия, при этом реакция восстановления наиболее легко осуществляется в растворах с высоким значением рН (12–14), то есть в щелочной среде. В то же время, необходимость создания защитной оболочки вокруг частиц наноникеля, заставляет проводить реакцию при низких значениях рН (< 7). Это связано с тем, что оптимальный путь создания защитной оболочки подразумевает использование таких сурфактантов, как длинноцепочечные органические кислоты, которые формируют гидрофобный слой вокруг металлической частицы, препятствуя тем самым ее дальнейшему росту (от наноразмеров) и коагуляции полученных частиц (рис. 2).

По мере протекания реакции кислотность среды возрастает, что приводит к сравнительно невысоким выходам продукта (~ 30 %). Выделенные частицы подвергались пиролизу в токе инертного газа, что привело к получению наночастиц никеля размером 20–30 нм, покрытых углеродным слоем толщиной 1-2 нм. Углеродный слой представляет собой смесь графитизированного и аморфного углерода.

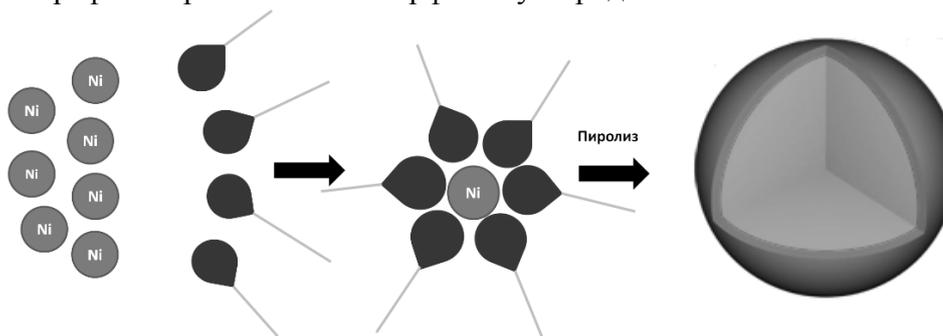


Рис. 2. Схема получения наночастиц никеля

В качестве термопластичной матрицы был выбран ПА-12, поскольку ненаполненный ПА-12 обладает высокой ударпрочностью (даже при низких температурах), эластичностью и высокой химической стойкостью. Эти характеристики способствуют широкому применению его в тяжелой промышленности (например как материал для изготовления подшипников скольжения).

Оптимальным способом получения нанокомпозитов является полимеризация *in situ*, так как другие методы их создания связаны с труднопреодолимыми проблемами агрегации частиц наполнителя, что затрудняет их равномерное распределение в полимерной матрице. Наличие защитного углеродного слоя обеспечивает решение двух задач – улучшает

совместимость наночастиц с полимерной матрицей и предохраняет частицы от разрушения в процессе синтеза (так как в качестве катализатора используется фосфорная кислота). В результате был получен набор полимерных композитов со степенями наполнения 0,1–1 мас.%. Были исследованы механические свойства полученных композитов. На рис. 3 представлены кривые сжатия.

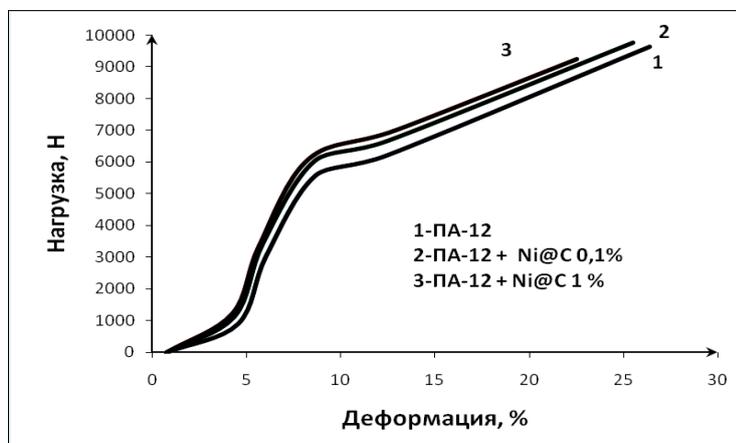


Рис. 3. Кривые сжатия: 1 – ненаполненного ПА-12; 2 – содержащего 0,1 мас.%Ni@C; 3 – содержащего 1 мас.% Ni@C

Как видно из приведенных данных, введение наночастиц никеля приводит к заметному росту прочностных характеристик полимерных композитов. Это подтверждают и данные прочностных характеристик, приведенные в Табл. 1 и 2.

Таблица 1

Средние значения для измерения предела прочности

Концентрация образца и наименование добавки	0 вес.%	0,1 вес.%	1 вес.%
Ni@C	43,540 МПа	51,390 МПа	54,181 МПа
Cu	55,636 МПа	53,889 МПа	53,059 МПа

Таблица 2

Средние значения для измерения относительной деформации

Концентрация образца и наименование добавки	0 вес.%	0,1 вес.%	1 вес.%
Ni@C	4,65 %	6,12 %	6,42 %
Cu	7,04 %	7,16 %	7,60 %

Также можно заключить, что введение наночастиц приводит к росту механических характеристик нанокомпозитов примерно на 15–20 % по сравнению с ненаполненным полимером, синтезированным в аналогичных условиях. При этом степень усиления ПА-12 мало зависит от концентрации модификатора. Аналогичный эффект наблюдался при получении нанокомпозитов на основе ПА-6, усиленных такими наночастицами, как фуллерен С60 [4]. Таким образом, поведение наночастиц одинакового размера при введении их в полимерный материал оказывается одинаковым благодаря наличию на их поверхности углеродного слоя. Это говорит о том, что поверхностный слой и размер полностью определяют действие наполнителей, что открывает широкие перспективы для использования выбранного метода модификации металлических частиц. Важным с экономической точки зрения является то, что даже при низких степенях наполнения достигается усиление механических свойств композитов. При этом следует отметить, что рост механических характеристик не приводит к потере их пластических свойств (рис. 4).

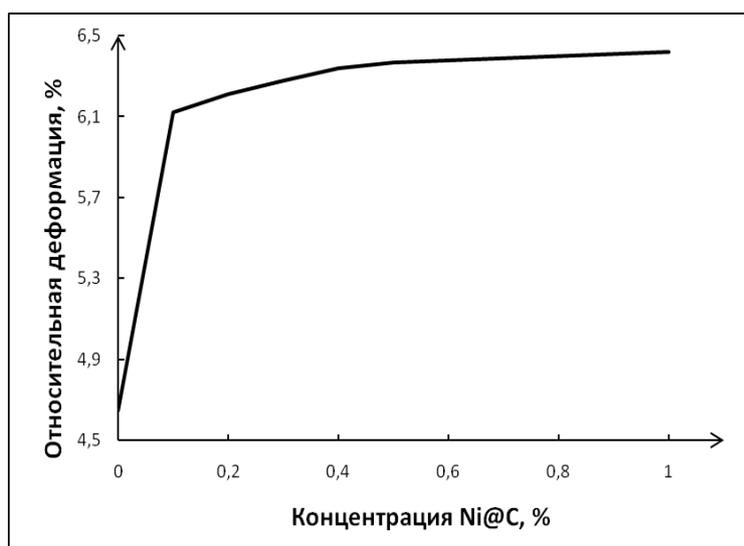


Рис. 4. Зависимость предельной деформации полимерных композитов от содержания Ni@C

Результаты синтеза наноразмерных частиц меди. Наиболее приемлемым методом синтеза металлических порошков меди является восстановление хлорида меди в аммиачном растворе борогидридом натрия. При этом реакция восстановления наиболее легко осуществляется в растворах с высоким значением pH (12-13). В этом случае медь выпадает в осадок и после просушки имеет темно-бордовый цвет. Самым сложным оказалось найти нужную концентрацию аммиака, то есть оптимальное значение pH. Если оно приближалось к 10, то получался малый выход продукта. Если становилось слишком большим, то получался побочный продукт в виде оксида меди.

Были предприняты попытки синтезировать наночастицы меди с углеродным покрытием. Также как в реакции при синтезе наноникеля, олеиновую кислоту добавляли в аммиачный раствор хлорида меди. В результате над раствором образовалась пена светло-голубого цвета, а после добавления борогидрида медь не выпала в осадок. Вероятнее всего это связано с тем, что отсутствовал контакт между пеной и раствором, содержащим восстановитель.

Нанокompозиты, также как и в предыдущем эксперименте, были получены методом *insitu*, так как он позволяет равномерно распределять наполнитель в матрице полимера. В результате испытанию на разрывной машине подверглись образцы с наполнением 0,1–1 мас.%. Результаты исследования механических характеристик отображены в графиках. На рис. 6 видно, что введение наночастиц меди приводит к ухудшению прочностных характеристик материала. Это также подтверждается падением значения модуля Юнга на 10 % и прочности приблизительно на 5 % (Табл. 1, 2).



Рис. 6. Кривые сжатия

Все эти результаты говорят о том, что наночастицы меди, полученные восстановлением меди из аммиачного раствора, не могут использоваться как наполнитель для полимерной матрицы. Их введение снижает механические свойства материала. Использование наночастиц никеля как модификатора для полимера приводит к гораздо лучшим показателям механических характеристик композитов. Это связано с тем, что наночастицы были покрыты углеродным слоем, что дает лучшее сцепление с полимерным материалом и сильно сказывается на механических показателях композита.

Заключение

При выполнении проекта был разработан метод получения наноразмерных частиц никеля (средний диаметр частиц 20–30 нм), защищенных от окисления тонким слоем углеродного покрытия (1-2 нм), а также метод синтеза наноразмерных частиц меди.

Методом полимеризации *insitu* получены полимерные композиты на основе матрицы ПА-12, наполненные 0,1–1 вес.% наноразмерными частицами никеля и меди. Показано, что при использовании в качестве добавки наноникеля, покрытого углеродным слоем, механические свойства полимерных композитов (модуль Юнга, предельная прочность) повышаются на 15–20 % по сравнению с не модифицированным ПА-12, синтезированным по выбранной методике.

При использовании в качестве добавки наноразмерных частиц меди механические свойства наполненного ПА-12 становились хуже приблизительно на 5–10 % по сравнению с ненаполненным ПА-12. Таким образом, можно сделать вывод, что метод синтеза наночастиц меди нуждается в доработке.

Публикации

1. Шаповал Е.С., Зуев В.В. Полимерные нанокомпозиты на основе полиамида 12, модифицированного наночастицами никеля // Физико-химия полимеров: Синтез, свойства и применение. 2013. № 19. С. 69–74.
2. Шаповал Е.С., Зуев В.В. Полимерные нанокомпозиты на основе полиамида 12, модифицированного наночастицами никеля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 92–95.
3. *Shapoval E.S., Zuev V.V.* Polymer nanocomposites based on polyamide 12 filled with nickel and copper nanoparticles // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1599. P. 450-452.

Литература

1. *Sunny V., Kumar D.S. et al.* Synthesis and properties of highly stable nickel/carbon core/shell nanostructures // Carbon. 2010. Vol. 48. No 5. P. 1643–1651.
2. *Jacob D. S., Genish I., Klein L., Gedanken A.* Carbon-coated core shell structured copper and nickel nanoparticles synthesized in an ionic liquid // The Journal of Physical Chemistry B. 2006. Vol. 110. No 36. P. 17711–17714.
3. *Dencheva N., Denchev Z., Oliveira M.J., Funari S.S.* Microstructure studies of in situ composites based on polyethylene/polyamide 12 blends // Macromolecules. 2010. Vol. 43. No 10. P. 4715–4726.
4. *Осипова И.В., Глущенко Г.А. и др.* Исследование наночастиц со структурой металлическое ядро – углеродная оболочка, образующихся при плазмохимическом синтезе в высокочастотном дуговом разряде // Журнал Сибирского федерального университета: Химия. 2011. Т. 4. № 3. С. 294–300.



Щеглов Константин Андреевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра вычислительной техники
E-mail: Scheglov.konstantin@gmail.com

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ЕЕ ЗАЩИТЫ

К.А. Щеглов

Научный руководитель – профессор А.А. Ожиганов

Цели работы – разработка математических моделей эксплуатационной информационной безопасности и метода проектирования средства защиты информационной системы.

В ходе работы предложен подход к проектированию систем защиты с использованием стохастических параметров (интенсивности возникновения и устранения) и характеристик уязвимостей, создающих угрозу несанкционированного доступа к обрабатываемым в вычислительной системе данным. Разработаны математические модели уязвимости, угрозы атаки и угрозы безопасности информационной системы, позволяющие рассчитывать параметры и характеристики безопасности вычислительной системы и средств ее защиты. Угрозу атаки (атаку) предложено представлять взвешенным графом последовательности эксплуатации злоумышленником уязвимостей, что позволило ее моделировать как систему с параллельным резервированием, а также сформулировать и решить задачу проектирования системы защиты в терминах теории надежности.

Разработана математическая модель потенциального нарушителя, характеризуемого количеством информации об уязвимости (о совокупности уязвимостей, эксплуатируемых атакой), которым должен обладать нарушитель для успешной реализации атаки и которая используется для количественной оценки актуальности ее угрозы. Введена и на орграфе актуальных угроз атак на информационную систему обоснована количественная оценка актуальности уязвимости в информационной системе, используемая в качестве критерия оптимальности при проектировании средства защиты. Она характеризуется количеством создаваемых уязвимостью угроз актуальных атак. Разработан метод проектирования средств защиты вычислительной системы, состоящий в выборе на орграфе актуальных угроз атак на систему оптимального набора решаемых задач защиты (средств защиты). При выполнении процедуры оптимального выбора в качестве критерия оптимальности используется количественная оценка актуальности уязвимости.

Математические модели эксплуатационной информационной безопасности

Большинство известных подходов к моделированию предлагают в качестве простейшего элемента информационной безопасности использовать угрозу атаки на информационную систему [1–7]. В работе [8] исследованы их недостатки и предложено в качестве элемента безопасности при моделировании рассматривать уязвимость (угрозу уязвимости) системы, что логично, так как в конечном счете угроза атаки создается выявляемыми в системе уязвимостями.

В качестве характеристики эксплуатационной безопасности информационной системы в отношении ее уязвимости предложено рассматривать вероятность того, что информационная система готова к безопасной эксплуатации. Обозначим ее

P_{0y} . Соответственно, математической моделью уязвимости (в общем случае группы уязвимостей, создающих одну и ту же угрозу – тип угрозы) является модель системы массового обслуживания (СМО), определяемая зависимостью: $P_{0y} = f(\lambda, \mu)$, где λ – интенсивность выявления, а μ – интенсивность устранения уязвимостей.

Допущение. При прогнозировании характеристик и при расчете параметров уязвимости сделано допущение в отношении использования марковских процессов – процессов без последствий, поскольку как-нибудь осмысленно количественно спрогнозировать влияние устранения уязвимости на интенсивность выявления новых уязвимостей не представляется возможным.

Угрозу атаки (атаку), предложено представлять соответствующим орграфом, проиллюстрированным рис. 1а, где через P_{0yr} , при $r = 1, \dots, R$ обозначается вероятность отсутствия в системе r -й уязвимости (информационная система готова к безопасной эксплуатации в отношении r -й уязвимости), одной из R уязвимостей, последовательно используемых атакой на информационную систему. Как видно из представленного орграфа, для успешного осуществления атаки в системе должны присутствовать все R уязвимостей. То есть каждая уязвимость, присутствующая в системе с вероятностью P_{0yr} , может рассматриваться в качестве резервирующего элемента (с вероятностью P_{0yr} предотвращает атаку). Это позволило построить модель угрозы атаки на информационную систему как схему параллельного резервирования (рис. 1б). Крайне важный результат – последовательное включение уязвимости в атаку может интерпретироваться как параллельное включение резервирующего элемента, в качестве которого выступает данная уязвимость с характеристикой P_{0yr} .

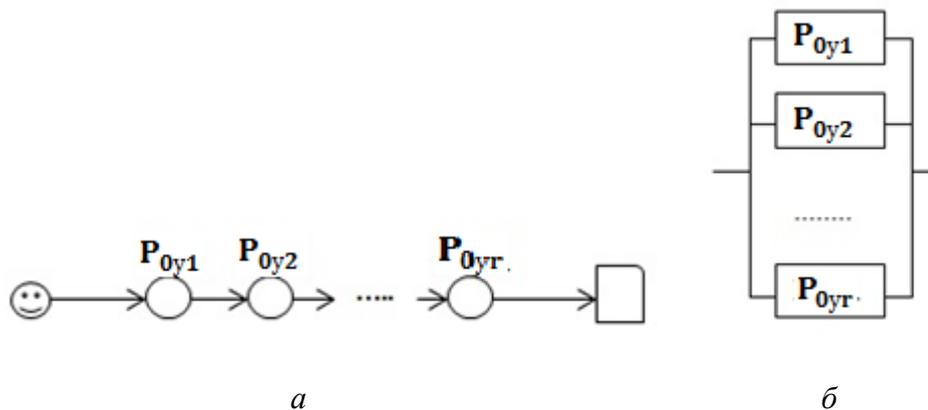


Рис. 1. а – пример орграфа угрозы атаки; б – схема параллельного резервирования

В результате представления угрозы атаки схемой параллельного резервирования получена математическая модель угрозы атаки, позволяющая определить ее ключевую характеристику – вероятность того, что информационная система готова к безопасной эксплуатации в отношении атаки, P_{0a} (очевидно, что события выявления и устранения разнородных уязвимостей независимы):

$$P_{0a} = 1 - \prod_{r=1}^R (1 - P_{0yr}).$$

Включение же в информационную систему средства защиты с целью нивелировать уязвимость на орграфе угрозы атаки (рис. 1а) может представляться включением в граф дополнительной взвешенной вершины. Для осуществления успешной атаки на информационную систему злоумышленник должен воспользоваться соответствующей уязвимостью ее безопасности, а также уязвимостью средства ее защиты (ошибки программирования, недостаточность механизмов защиты, некорректность реализации механизма защиты и т. д.) с соответствующими параметрами $\lambda_{сзи}$ и $\mu_{сзи}$, используемого для

нивелирования уязвимости. То есть средство защиты, как и уязвимости, используемые атакой, включается в схему параллельного резервирования. Для средства защиты могут быть построены соответствующие математические модели уязвимостей.

Полученная модель позволила сделать важнейший вывод. В отношении защиты от угрозы атаки, рассматриваемой как последовательность использования уязвимостей, неважно, какая из уязвимостей, используемых атакой, нивелируется средством защиты. Важны лишь параметры $\lambda_{сзи}$ и $\mu_{сзи}$ средства защиты, поскольку все средства защиты (вне зависимости от того, какая уязвимость ими нивелируется) включаются в схему резервирования одинаково (как параллельный резерв).

Угроза информационной системе в целом характеризуется совокупностью потенциально возможных актуальных угроз атак на нее. На практике информационную систему целесообразно описывать совокупностью актуальных угроз атак, определяемых на основании заданного для системы предельного значения характеристики P_{0a} . С учетом того, что отдельная угроза атаки может быть представлена орграфом (рис. 1), соответствующим орграфом, но уже совокупности атак, предложено представлять и угрозу информационной системе в целом (рис. 2).

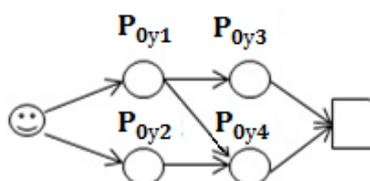


Рис.2. Пример орграфа угрозы безопасности информационной системы

Используя представленную выше интерпретацию угрозы атаки как схему параллельного резервирования, можно построить соответствующую схему, но уже последовательно-параллельного резервирования, для информационной системы в целом. Различные атаки в орграфе можно рассматривать в качестве последовательного резерва, поскольку реализация любой из них приводит к нарушению безопасности информационной системы – осуществлению несанкционированного доступа. Значение характеристики эксплуатационной безопасности информационной системы в целом можно обозначить $P_{0исц}$.

Замечание. Применение подобной интерпретации позволило обосновать некорректность следующей расчетной формулы для оценки угрозы информационной системы:

$$P_{0y} = \prod_{r=1}^R P_{0yr},$$

что обуславливается зависимостью большинства угроз на уровне используемых ими уязвимостей (на рис. 2 это первая и четвертая уязвимости).

Сделан вывод о том, что корректная расчетная формула для конкретной информационной схемы при моделировании ее уязвимости может быть получена только в результате построения схемы последовательно-параллельного резервирования.

В результате проведенных исследований в качестве критерия актуальности уязвимости предложено использовать коэффициент k [8]:

$$k = US,$$

где U – число актуальных атак, входящих в вершину уязвимости на орграфе, S – число актуальных атак, исходящих из нее. Это подтверждается сделанным ранее выводом о том, что не принципиально, какая уязвимость нивелируется средством защиты, важны лишь значения эксплуатационных параметров данного средства.

Предложенный подход к количественному оцениванию актуальности уязвимости в информационной системе положен в основу разработанного метода проектирования средства ее защиты и будет изложен далее.

Для построения математической модели, позволяющей оценить риск осуществления атаки в информационной системе, необходимо построить математическую модель нарушителя. Для этого с целью оценки сложности реализации атаки S_y предложено использовать вероятностную меру количества информации $I(P_{0y})$. Злоумышленник для осуществления успешной атаки на уязвимость должен обладать соответствующей информацией в отношении присутствия уязвимости в системе, то есть получить сведения, уменьшающие неопределенность в отношении данной уязвимости, количество которой $I(P_{0y})$ определяется следующим образом [8, 9]:

$$S_y = I(P_{0y}) = -\log_2(1 - P_{0y}).$$

Чем больше требуется злоумышленнику информации в отношении уязвимости системы для осуществления успешной атаки на нее, тем сложнее реализация самой атаки.

Корректность использования данного подхода для построения модели нарушителя обуславливается тем, что построенная модель соответствующим образом позволяет учесть нелинейность зависимости изменения сложности реализации атаки от изменения характеристики P_{0y} .

Замечание. Единицу сложности реализации атаки на уязвимость: $S_y = I(P_{0y}) = 1$ задает условие: $P_{0y} = 0,5$, определяющее, что уязвимость с равной вероятностью либо присутствует в системе, либо нет.

Поскольку угроза атаки в общем случае должна рассматриваться как последовательность использования злоумышленником выявленных и не устраненных в системе уязвимостей, имеющих характеристики P_{0yr} и S_{yr} , $r = 1, \dots, R$, введена характеристика сложности реализации атаки S_a :

$$S_a = I(P_{0a}) = -\log_2(1 - P_{0a}) = -\log_2 \prod_{r=1}^R (1 - P_{0yr}) = \sum_{r=1}^R I(P_{0yr}) = \sum_{r=1}^R S_{yr}.$$

Математическая же модель нарушителя (количественная интегральная оценка возможности реализации злоумышленником атаки на конкретную информационную систему) при этом определяется следующим образом:

$$S_{ан} = \max\{S_{анm}, m = 1, \dots, M\},$$

где $S_{ан}$ – максимальная сложность реализованных в подобной информационной системе атак (выбираемая в качестве аналога при проектировании системы защиты конкретной информационной системы), определяемая на множестве выявленных атак на подобную информационную систему в процессе ее эксплуатации $S_{анm}$, $m = 1, \dots, M$.

Имея значение характеристик S_a и $S_{ан}$, можем определить коэффициент готовности злоумышленника осуществить успешную атаку сложности S_a на информационную систему, $K_{га}$, определяемый следующим образом [8]:

$$K_{га} = \begin{cases} \frac{S_{ан}}{S_a}, & \text{если } S_{ан} < S_a, \\ 1, & \text{если } S_{ан} \geq S_a. \end{cases}$$

При этом:

$$K_{га} = \frac{S_{ан}}{S_a} = \frac{\log_2(1 - P_{0ан})}{\log_2(1 - P_{0a})} = \log_{1 - P_{0a}}(1 - P_{0ан}).$$

Математическая модель для расчета вероятности реализации успешной атаки на информационную систему, P_a имеет вид:

$$P_a = K_{га}(1 - P_{0a}) = K_{га} \prod_{r=1}^R (1 - P_{0yr}).$$

Вероятность того, что атака на информационную систему не будет осуществлена, то есть система готова к безопасной эксплуатации в отношении атаки с учетом модели нарушителя, определяется как $P_{0a} = 1 - P_a$. Готовность нарушителя осуществить успешную

атаку не может рассматриваться как уязвимость системы в отношении атаки. Следовательно, при проектировании в оргграф угрозы атаки может быть включена дополнительная вершина, взвешенная значением, равным $1-K_{га}$.

Метод проектирования системы защиты информационной системы

Разработанный метод проектирования [8] состоит в выборе актуальных средств защиты – набора актуальных уязвимостей, которые должны нивелироваться системой защиты (функциональное проектирование), и в формировании требований к значениям параметров эксплуатационной информационной безопасности применяемых средств защиты. Выбор актуальных уязвимостей осуществляется разработанным методом оптимизации на графе с выбором на каждой итерации актуальной уязвимости для нивелирования средством защиты из условия $\max k$. Для формирования требований к значениям параметров эксплуатационной информационной безопасности применяемых средств защиты разработан метод динамического программирования, позволяющий решать задачу проектирования в два этапа. Предварительно анализируется модифицированный граф, получаемый на стадии формального проектирования с внесенными в него вершинами средств защиты информации. На первом этапе исключаются «неактуальные угрозы атак», которые не влияют на формирование соответствующих требований. На втором этапе уже с учетом исходно заданных требований к характеристике P_{0a} – требования P_{0amin} , для средств защиты рассчитываются значения эксплуатационных параметров $\mu_{сзи}$ и $\lambda_{сзи}$.

Заключение

В основу разработанных математических моделей положено использование в качестве элемента информационной безопасности не угрозы атаки, как в большинстве известных подходов к проектированию средств защиты, а уязвимости. Это обуславливается тем, что защита от угрозы атаки на информационную систему, в конце концов, сводится именно к реализации защиты от атаки на конкретную уязвимость, используемую атакой. Следовательно, задача проектирования системы защиты априори предполагает нахождение актуальных уязвимостей, в отношении которых должна реализовываться защита.

Использование статистических оценок параметров уязвимостей при моделировании позволяет решать рассмотренные задачи без использования экспертных оценок, в том числе и при построении модели нарушителя, что подтверждает адекватность получаемых моделей.

Разработанный метод проектирования апробирован и может быть практически использован при проектировании систем защиты информационных систем, используемых в различных отраслях народного хозяйства.

Публикации

1. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Защита от атак на уязвимости приложений. Модели контроля доступа // Вопросы защиты информации. 2013. № 2. С. 36–43.
2. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Эксплуатационные характеристики риска нарушений безопасности информационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 129–139.
3. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Математические модели эксплуатационной информационной безопасности // Вопросы защиты информации. 2014. № 3. С.52–65.

Литература

1. Белов Е.Б., Лось В.П., Мещеряков Р.В., Шелупанов А.А. Основы информационной безопасности: Учебное пособие для вузов. М., 2006. – 544 с.
2. Корт С.С. Теоретические основы защиты информации: Учебное пособие. М., 2004. – 240 с.
3. Корченко А.Г. Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практические решения. Киев, 2006. – 320 с.

4. Малюк А.А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. Учебное пособие для вузов. М., 2004. – 280 с.
5. Мельников В.В. Безопасность информации в автоматизированных системах. М., 2003. – 368 с.
6. Росенко А.П. Внутренние угрозы безопасности конфиденциальной информации: Методология и теоретическое исследование. М., 2010. – 160 с.
7. Соколов А.В., Шаньгин В.Ф. Защита информации в распределенных корпоративных сетях и системах. М., 2002. – 656 с.
8. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Математические модели эксплуатационной информационной безопасности // Вопросы защиты информации. 2014. № 3. С.52–65.
9. Щеглов К.А., Щеглов А.Ю. Эксплуатационные характеристика риска нарушений безопасности информационной системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 129–139.



Шукин Александр Николаевич
Факультет компьютерных технологий и управления
Кафедра систем управления и информатики
E-mail: shhukinaleksandr1990@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «УМНЫЙ ДОМ»

А.Н. Шукин

Научный руководитель – доцент А.С. Кремлев

Проект посвящен разработке лабораторного стенда для обучения студентов основам построения систем управления домашней автоматикой. Основные задачи проекта – разработка стенда на основе свободно программируемого контроллера EVIKA Logic Machine 2, создание пользовательского интерфейса и сценариев работы стенда для реализации автоматического и удаленного ручного управления им.

В ходе работы был рассмотрен наиболее актуальный стандарт автоматизации зданий KNX/EIB, который позволяет объединить в единое целое до 65000 устройств. Также был проведен выбор управляющих контроллеров согласно требованиям стандарта KNX/EIB, периферийных устройств на основе требуемого функционала системы и расчета потребляемой мощности, разработан пользовательский интерфейс стенда и сценарии его работы [1].

Для построения домашних автоматизированных систем в настоящее время используется большое количество технологий, таких как KNX/EIB, BACnet, LonWorks, Industrial Ethernet и многих других. Свободно программируемый контроллер EVIKA Logic Machine 2, который предоставлен в качестве начальной точки разработки, спроектирован специально для работы с наиболее актуальным и современным стандартом автоматизации – KNX/EIB.

KNX/EIB – европейский стандарт (CENELEC EN 50090 и CEN EN 13321-1), который поддерживается большим количеством крупных мировых производителей. При его применении нагрузка подключается опосредовано, все элементы управления, так называемые сенсоры, и непосредственно сами исполнительные элементы соединяются через общую среду передачи данных (витую пару и/или радиоканал, и/или силовую линию PL).

Любое нажатие кнопки или действие вызывает передачу информации (телеграммы) через среду передачи данных к соответствующему исполнительному устройству [2].

Основой для решения поставленной задачи служит свободно программируемый контроллер EVIKA Logic Machine 2 (рис. 1). Он предназначен для реализации комплексной логики работы устройств в сетях KNX/EIB. Программируемый контроллер позволяет эффективно выстраивать процесс автоматизации зданий в соответствии с предъявленными требованиями, обеспечивая неограниченные возможности при минимальных затратах.

Контроллер Logic Machine 2 представляет собой встраиваемую платформу с интерфейсами FT1.2 и Ethernet, что позволяет расширять возможности KNX/EIB, управляя логикой работы устройств сети и отношениями между объектами посредством пользовательских скриптов. Используя встроенный веб-сервер и пользовательские скрипты, Logic Machine 2 может исполнять функции панелей управления термостатирования, системы безопасности, освещения и прочих одновременно. Для создания скриптов используется язык программирования промышленных платформ – Lua, дополненный модулем поддержки KNX устройств [3].



Рис. 1. Контроллер EVIKA Logic Machine 2

Функциональная схема системы представлена на рис. 2.

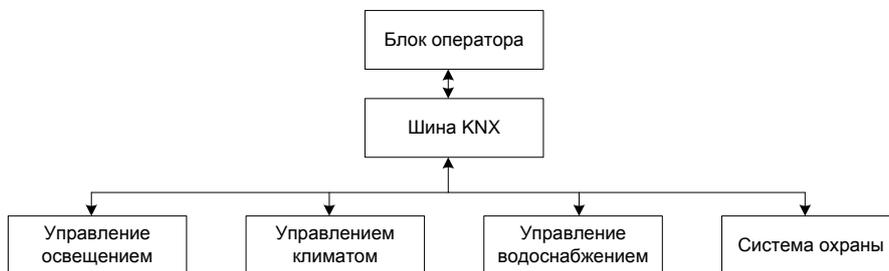


Рис. 2. Функциональная схема лабораторного стенда

Лабораторный стенд содержит управляющий блок оператора, систему управления освещением, блоки управления климатом и водоснабжением, а также систему охраны. Обмен данными и управление соответствующим блоком осуществляется через шину KNX. Блок управления освещением включает в себя все конечные устройства, такие как лампы накаливания, переключатели и другие, управление которыми осуществляется с помощью специальных контроллеров. Блок управления климатом содержит датчики, которые передают актуальную информацию о температуре, влажности и других параметрах, а также конечные устройства, необходимые для поддержания комфортных условий проживания. Блок управления водоснабжением содержит управляемые краны подачи воды, счетчики и датчики. Система охраны необходима как для защиты пользователя, так и для защиты системы от внешних воздействий, состоит из системы наблюдения и датчиков движения и присутствия.

Многие крупные производители, такие как Siemens (серия DESIGO), Jung (TX – серии), HDL, Embedded Systems (EVIKA) и другие, предоставляют системы для управления различными коммуникациями «умного дома». Главными критериям выбора управляющих

модулей являются полная совместимость со стандартом KNX/EIB, доступность и максимальный функционал.

Чтобы избежать минимальной несовместимости оборудования, было принято решение использовать в качестве управляющих модулей (шинных устройств) продукцию компании EVIKA. Для обеспечения наиболее полного охвата всех основных функций «умного дома» были выбраны следующие управляющие модули:

- контроллер четырех датчиков температуры IPT4-KNX;
- диммер и секвенсор световых сцен LED3-KNX;
- диммер четырех каналов 1-10 В AODIM4-KNX;
- универсальный контроллер ввода/вывода UIO8v2-KNX;
- модуль-шлюз DALI RS485.

Выбранные управляющие контроллеры фирмы EVIKA позволяют построить систему управления «умным домом» практически из любых периферийных устройств. На данном этапе разработки было принято решение использовать следующие компоненты:

1. Маршрутизатор ASUS WL520-GU.
2. IP-видеокамера D-LINK DCS-2130.
3. Шаровый кран Neptun Bugatti 220.
4. Датчик протечки Нептун SW 005 2,0.
5. RGB-светодиодная лента RTW-5000E 12V (5060, 300, LED, LUX).
6. Счетчик электроэнергии Меркурий 201.2.
7. Датчик движения Ругонix Colt Quad PI.
8. Геркон.
9. Реле WAGO 788-304.
10. Диммер DIUNY RE EL 2000.
11. Лампы накаливания 60 W.
12. Датчики температуры PT1000.

Все элементы системы управления «умным домом» для наглядности и удобства транспортировки установлены в навесной щит АBB АТ32 с прозрачной дверцей. Выбранный щит с DIN-рейкой может вмещать до семидесяти двух элементов и обладает степенью защиты IP43.

Также в разработанной системе используется геркон для обнаружения открытия щита, два реле WAGO 788-304 с креплением на DIN-рейку, две лампы накаливания 60 W и четыре датчика температуры PT1000.

Таким образом, функциональная схема лабораторного стенда примет вид, показанный ниже на рис. 3.

После окончания сборки системы требуется настроить физические и групповые адреса устройств согласно стандарту KNX/EIB. Для управляющих модулей фирмы EVIKA понадобится также установить аппликационные программы, которые предоставлены на сайте производителя. Все эти операции производятся с помощью специального программного пакета ETS 3 Professional.

С помощью этой программы также можно полностью проверить проект: искусственно вводить какие-либо значения, посылать управляющие телеграммы, проверить целостность созданной шины KNX/EIB. После создания проекта в программу загружаются базы данных, содержащие аппликационные программы устройств. Чтобы загрузить программу в устройство нужно включить питание в системе, установить связь между программой и шиной KNX/EIB, нажать и удерживать служебную кнопку на устройстве. Если программа обнаружила устройство, она предложит установить стандартную аппликационную программу для проверки его работоспособности. После успешной установки аппликационной программы ее можно менять в соответствии с поставленной задачей.

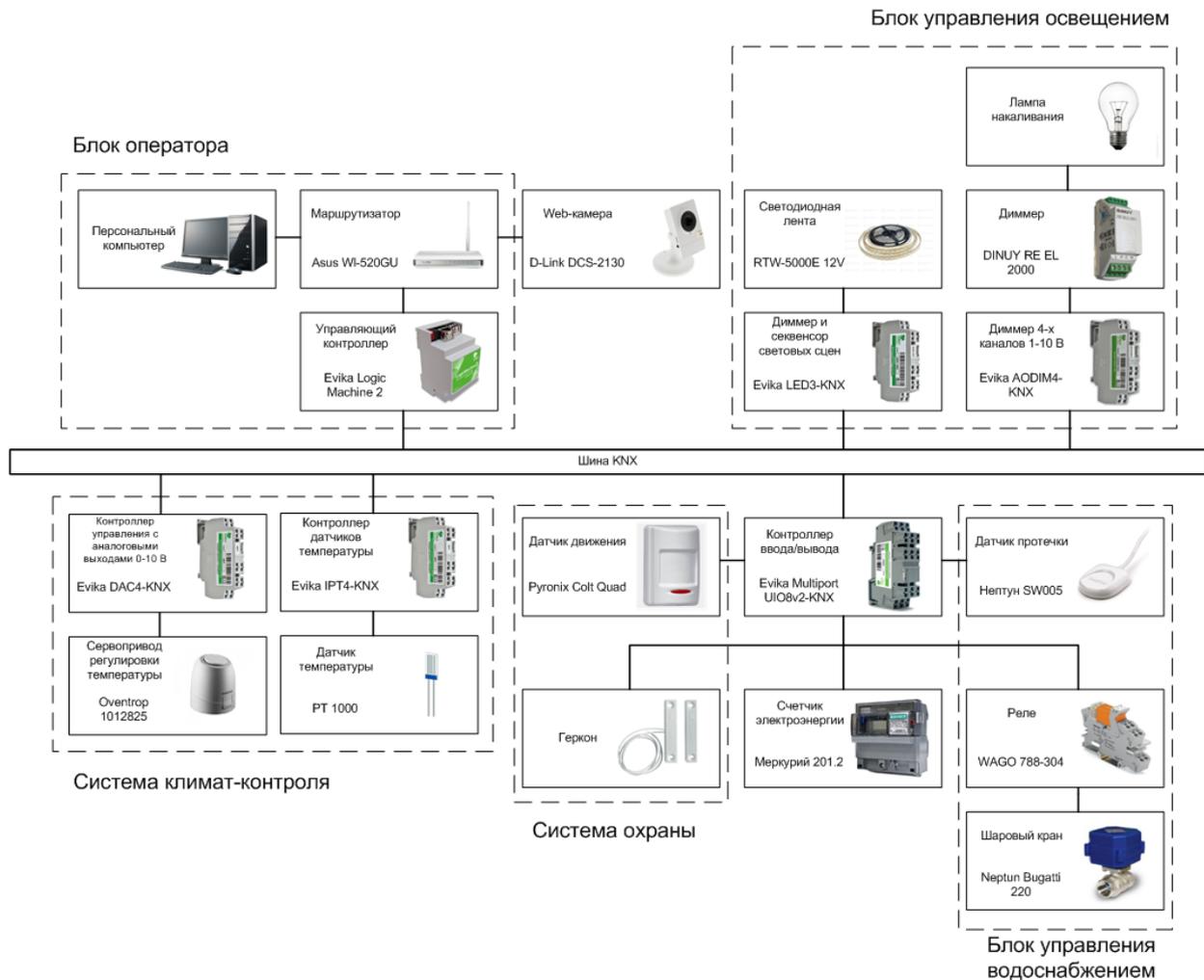


Рис. 3. Функциональная схема лабораторного стенда с выбранными управляющими и периферийными устройствами

Главная задача проекта – создание топологии будущей системы управления. При обнаружении устройства ему автоматически присваивается физический адрес, который впоследствии можно поменять. После того как назначены все необходимые физические адреса и загружены соответствующие аппликационные программы для управляющих модулей, назначаются групповые адреса системы, с помощью которых осуществляется передача телеграмм и функции конечных исполнительных устройств связываются между собой. Далее все аппликационные программы управляющих модулей должны быть обновлены.

Создание пользовательского интерфейса и программирование сценариев работы системы производится непосредственно в операционной системе контроллера EVIKA Logic Machine 2, которая позволяет автоматически распознать все элементы созданной шины KNX/EIB вместе с их групповыми и физическими адресами.

В представленной версии системы разработано три сценария обработки информации: запись показания счетчика в базу данных с пересчетом в виде кВт/ч; перекрытие подачи воды шаровым краном при наличии протечки и включение лампы накаливания при открытии дверцы щита. Разработан пользовательский интерфейс для сенсорных устройств (рис. 4), позволяющий изменять яркость и цвет светодиодной ленты, менять заранее установленные световые сцены, управлять включением и яркостью лампы накаливания, получать данные с IP-видеокамеры, текущее значение с датчиков движения, контроля протечки, электросчетчика, состояния шарового крана с электроприводом и показания датчиков температуры.

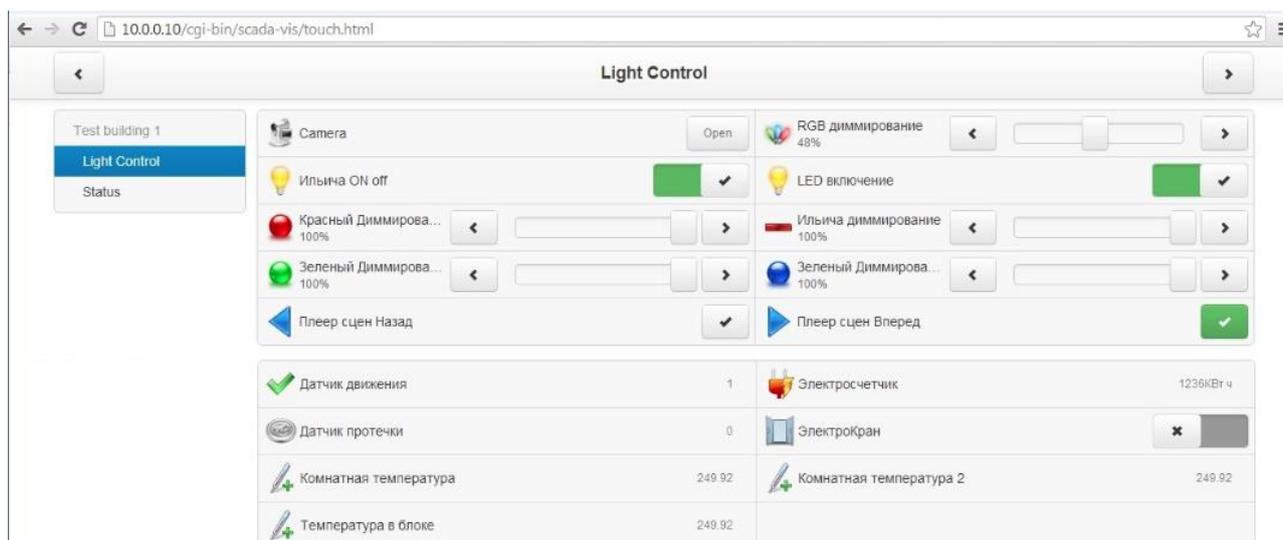


Рис. 4. Пользовательский интерфейс стенда

Внешний вид разработанного лабораторного стенда представлен на рис. 5. Все управляющие модули, блоки питания, а также некоторые конечные (периферийные) устройства установлены на DIN-рейку, светодиодная лента закреплена на дверце щита, геркон установлен в левом нижнем углу, ответная часть закреплена на дверце. Камера может быть расположена в любом месте в радиусе действия зоны WI-FI в зависимости от длины шнура питания. Остальные периферийные устройства подключаются к стенду через разъемы RJ-45 и специальные клеммники, которые расположены в отверстиях в нижней части щита. Элементы вместе с соединительными проводами укрываются защитными панелями.



Рис. 5. Внешний вид разработанного лабораторного стенда «умный дом»

Заключение

В ходе выполнения проекта был разработан лабораторный стенд с функциональными возможностями «умного дома», предложены сценарии работы системы и пользовательский интерфейс.

В работе был проведен обзор стандарта KNX/EIB и свободно программируемого контроллера EVIKA Logic Machine 2, разработана функциональная схема системы, описаны ее управляющие и периферийные модули, с помощью которых обеспечивается реализация

основных функций «умного дома», разработана электрическая схема соединений лабораторного стенда, проведена его сборка и настройка шины KNX/EIB.

Разработанный лабораторный стенд может быть применен для обучения основам построения систем управления домашней автоматикой в качестве материальной базы для выполнения лабораторных и практических работ.

Публикации

1. *Кремлев А.С., Щукин А.Н., Маргун А.А., Базылев Д.Н., Зименко К.А.* Активный метод обучения по направлению подготовки 220100 «Системный анализ и управление» // Открытое и дистанционное образование. 2014. № 3 (55). С. 50–53.
2. *Zimenko K.A., Margun A.A., Kremlev A.S., Shchukin A.N., Bazylev D.N.* Active learning method in “System Analysis and Control” area // 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). 2014. P. 1–5.
3. *Кремлев А.С., Щукин А.Н.* Активный метод обучения в освоении учебного материала по направлению подготовки 220100 «Системный анализ и управление» // Инновации в образовании. 2014. № 8. С. 67–72.

Литература

1. KNX. Руководство по системной технике для автоматизации зданий и домов, 4-е изд. 2006. – 193 с.
2. *Merz H., Hanseman T., Huber C.* Building automation: Communication systems with EIB/KNX, LON and BACnet. 2009. – 282 с.
3. Компания EVIKA [Офиц. сайт]. URL: <http://www.evika.ru> (дата обращения: 02.04.2014).



Ягунов Илья Валерьевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
Кафедра инженерной фотоники
E-mail: yagunov.ilya@gmail.com

ДИАМАГНЕТИК НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА ИЗ МАССИВА КУБИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.В. Ягунов

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

Цели работы:

- численное моделирование изотропного широкополосного метаматериала разной толщины, составленного из кубических элементов, в пакете электромагнитного моделирования CST Microwave Studio;
- вычисление коэффициентов отражения и пропускания;
- последующая экстракция значений диэлектрической и магнитной проницаемостей;
- экспериментальная проверка полученных теоретически результатов и достижение магнитной проницаемости $\mu = 0,15$.

Первым шагом теоретического исследования был поиск модели, описывающей метаматериал на основе массива из кубических элементов. Такая работа уже была проделана, [1, 2] поэтому мы использовали аналитические формулы для оценки диэлектрической и магнитной проницаемостей. Ниже приведены выражения для определения показателя преломления (n), импеданса (Z), диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей, а также рис. 1, поясняющий значения коэффициентов a и b .

$$n = \sqrt{2\epsilon_h}, \quad Z = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_h}} \left(1 - \frac{b}{a}\right),$$

$$\mu = 1 - \frac{b^2}{a^2}, \quad \epsilon = \frac{\epsilon_h}{1 - b/a},$$

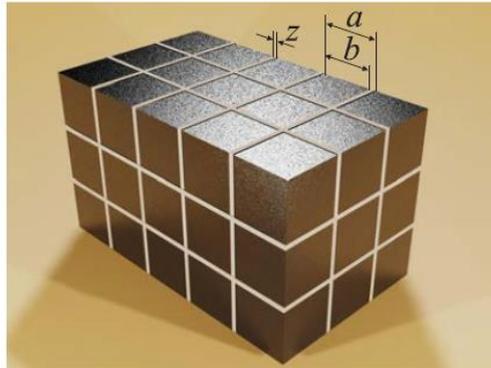


Рис. 1. Метаматериал, составленный из массива кубических элементов:
 b – размер стороны кубика, z – величина зазора между кубиками. $a = b + z$

Как видно из рисунка, метаматериал представляет собой массив кубических элементов, упорядоченных в прямоугольную структуру. Каждая элементарная ячейка – кубик с окружающим его воздушным зазором. Данную структуру можно рассматривать как эффективную среду, описываемую материальными параметрами – диэлектрической и магнитной проницаемостями. В найденной нами модели материал каждого кубика – PEC – Perfect Electric Conductor, то есть идеально проводящий металл, характеризующийся бесконечной проводимостью и отсутствием потерь. Он не реализуем на практике, поскольку любой металл обладает конечным сопротивлением и, как следствие, конечной проводимостью. В некоторых случаях PEC пригоден для моделирования хорошо проводящих металлов. Кроме того, такое численное моделирование делает расчет гораздо быстрее. Однако в случае предложенной выше структуры численное моделирование PEC и реального металла дало различные результаты, поэтому все дальнейшие расчеты было решено проводить только с реальным металлом.

Следующей задачей был выбор металла – доступного по цене, легкого в обработке и слабо взаимодействующего с магнитным полем. Среди всех прочих наиболее дешевым и доступным оказался алюминий. Кроме того, он удовлетворяет условию легкости в обработке и не подвержен коррозии.

Обязательное требование структуры – отсутствие контакта между металлическими гранями. Идеальная модель предполагает наличие вакуума в зазорах между кубиками, однако экспериментально воздушные зазоры не реализуемы, поэтому лучшее решение – использовать диэлектрик, который должен обладать небольшими потерями. В противном случае волна будет сильно затухать в слое метаматериала. Таким требованиям удовлетворяет сухой клей с $\epsilon = 3,9 + 0,3i$. Кроме того, клей можно использовать для сцепления кубиков друг с другом в прямоугольный массив. Таким образом, будут разрешены две технические проблемы – придание образцу прочной прямоугольной формы и разделение элементарных ячеек диэлектрическим зазором.

Резюмируя, можно сказать, что для численного моделирования с CST Microwave Studio будет использована модель с металлическими кубиками, разделенными диэлектрическим зазором с $\epsilon = 3,9 + 0,3i$.

В результате численного моделирования полученные S -параметры (коэффициенты отражения и пропускания) будут использованы для экстракции диэлектрической и магнитной проницаемости по методу NRW суть которого состоит в том, что реальная композиционная структура сопоставляется с эквивалентным (применительно к отражению и прохождению нормально падающей плоской волны) сплошным материалом. Для нормально падающей волны процесс экстракции описан в статье [3]. При повороте метаматериала на угол θ материальные параметры могут сильно варьироваться, и важно знать их изменение в зависимости от угла поворота образца. Работы в этом направлении были сделаны группами ученых [4–7]. Статьи [5–7] носят больше теоретический характер и малоприменимы для случая массива кубических элементов, однако результаты [4] можно использовать для определения зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей метаматериала от угла падения волны.

Для проведения эксперимента в лаборатории существует хорошая материально-техническая база. Изготовление кубиков может проводиться на фрезерно-сверлильном станке. Склеенная и высушенная структура будет помещена в волновод WR90, рассчитанный для частот 8–12 ГГц. Коэффициенты отражения и пропускания будут измерены при помощи векторного анализатора цепей. Отсутствие шумов будет обеспечено безэховой камерой, где и планируется провести эксперимент. Далее, как упоминалось выше, будет выполнена экстракция материальных параметров и сравнение с результатами, полученными теоретически.

Исходя из предложенных выше уточнений, первые этапы моделирования в CST Microwave Studio были проведены, и экстракция материальных параметров выполнена. Результаты представлены на рис. 2 и 3.

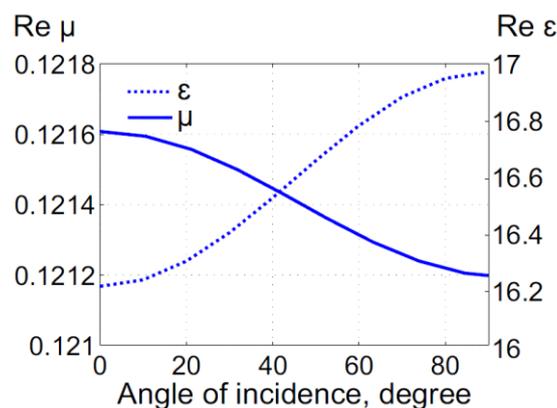


Рис. 2. Зависимость диэлектрической и магнитной проницаемостей (вещественная часть) от угла падения волны

Как видно из рис. 2, материальные параметры метаматериала зависят от угла падения волны. Расчет проводился на частоте 10 ГГц, параметры системы: $a = 1,6$ мм; $b = 1,5$ мм. Для численного моделирования использовали метаматериал толщиной в три элементарные ячейки (по направлению распространения волны). В остальных направлениях метаматериал был смоделирован бесконечно протяженным: для этого использовались бесконечные периодические граничные условия.

Диамagnetные свойства метаматериала проявляются в широком диапазоне (рис. 3). Это подтверждает пример метаматериала с параметрами элементарной ячейки $a = 1,6$ мм; $b = 1,5$ мм в частотном диапазоне 30 кГц–1 ГГц. Так, магнитная проницаемость преодолевает границу 0,2 и начинает расти приблизительно с 500 кГц, метаматериал теряет диамagnetные

свойства и становится проводником. В остальном измеренном диапазоне частот 500 кГц–1 ГГц магнитная проницаемость плавно уменьшается с 0,2 до 0,121.

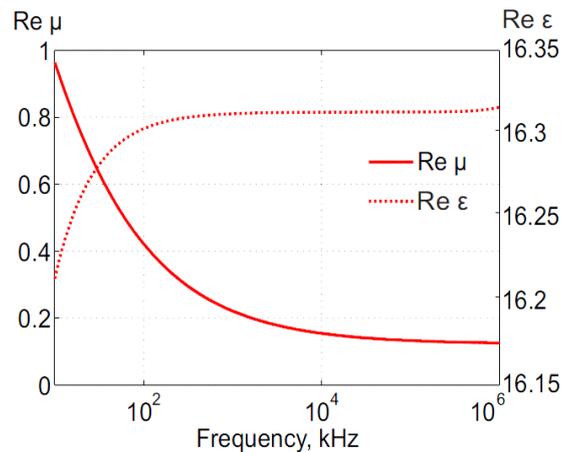


Рис. 3. Зависимость диэлектрической и магнитной проницаемостей (вещественная часть) в широком частотном диапазоне

Для проверки теоретических результатов были собраны несколько образцов метаматериала протяженностью в один, два и четыре слоя. Кубики со стороной 1,6 мм были выточены из алюминия, и, чтобы создать узкий зазор между ними и в то же время скрепить их вместе, был использован сухой клей. Измерение диэлектрической проницаемости тонкого слоя клея показало следующий результат $\epsilon = 3,9 + 0,3i$ в исследуемом диапазоне частот. Зазор между кубами варьировался между 0,1–0,2 мм. Фотография экспериментальной установки показана на рис. 4. Массив из кубиков 11x5 был помещен в волновод WR-90 (сечение 22,86 x 10,16 мм² в X-диапазоне 8,5–12 ГГц). Коэффициенты отражения и пропускания были измерены при использовании векторного анализатора цепей E8362C PNA.

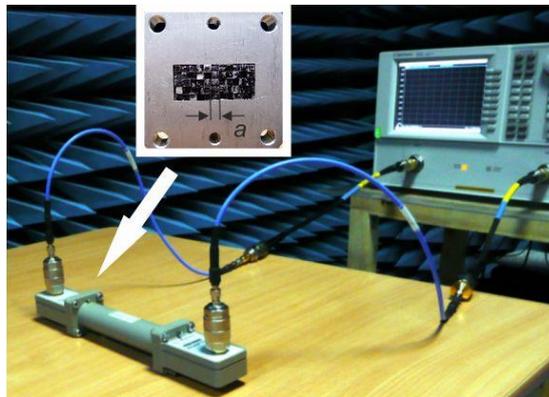


Рис. 4. Фотография экспериментальной установки

Первым шагом исследования был однослойный образец (вставка *a* на рис. 4). Были измерены коэффициенты отражения и пропускания, а также использована техника экстракции [3] для извлечения материальных параметров. Полученные значения показателя преломления, диэлектрической и магнитной проницаемостей показаны на рис. 5*a*, *b* и *c* соответственно. Показано среднее значение восьми измерений (четыре образца измеряли с двух сторон). Среднее значение реальной части показателя преломления равно трем, мнимая часть приблизительно – 0,5 в диапазоне частот 8,5–12 ГГц. Диэлектрическая проницаемость варьируется между 60 и 50, мнимая часть около 30. Высокое значение мнимой части может быть объяснено сильными рассеянием на неоднородностях поверхности. Действительная часть магнитной проницаемости приблизительно равна 0,15, мнимая – около 0,01.

Для проверки сходимости экстрагированных материальных параметров был рассмотрен образец метаматериала с двумя слоями в направлении распространения волны в том же самом частотном диапазоне 8–12 ГГц. Фотография образца и экстракция в результате четырех измерений (два образца с двух сторон) изображены на рис. 5*d*, *e* и *f*. Вновь действительная часть усредненного показателя преломления равна трем, мнимая часть варьируется между 0,5–0,1. Среднее значение диэлектрической проницаемости убывает от 60 до 10, в то время как мнимая часть равна 50. С другой стороны, действительная часть магнитной проницаемости слабо изменилась по сравнению с однослойным образцом и равна 0,15, а мнимая часть ниже 0,1.

Увеличение величины мнимой части по сравнению с однослойным образцом вызвано увеличением числа слоев и, как следствие, увеличением числа неоднородностей, на которых рассеивается электромагнитное излучение.

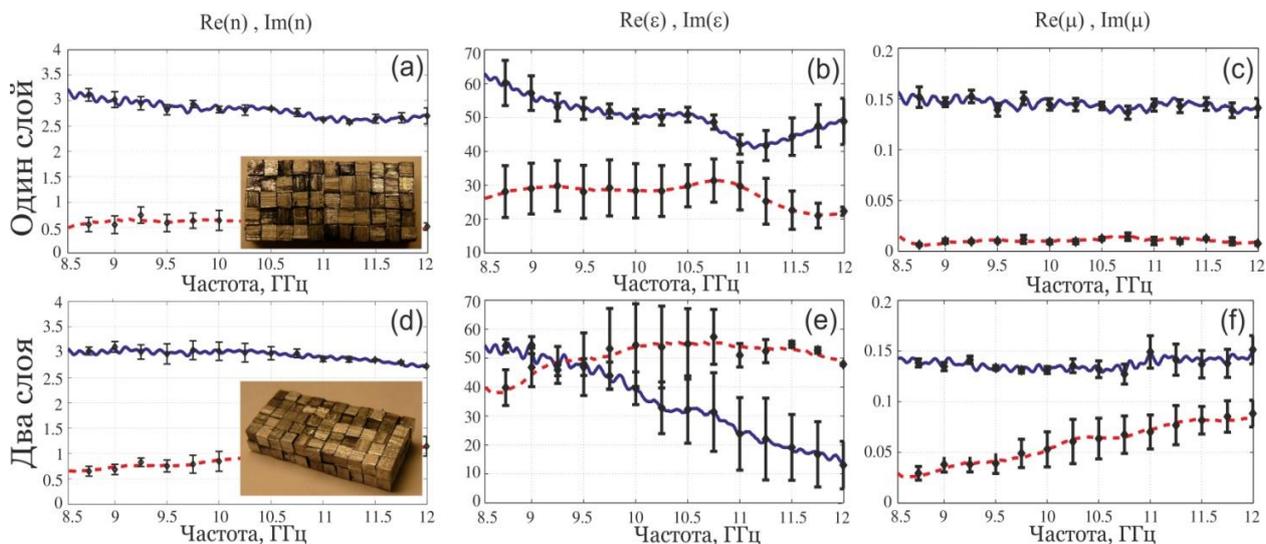


Рис. 5. Экстракция из одного и двух слоев метаматериала: *a*, *d* – показатели преломления; *b*, *e* – диэлектрическая проницаемость; *c*, *f* – магнитная проницаемость. Действительная часть обозначена сплошной линией, мнимая – пунктирной, погрешность измерений показана вертикальными линиями

В завершении была проведена экспериментальная проверка результатов образца с четырьмя слоями (рис. 6). Результаты показателя преломления и диэлектрической проницаемости в среднем такие же, как и в предыдущих случаях для одного и двух слоев метаматериала. Мнимая часть возросла, поскольку увеличились потери на рассеяние. Однако экстрагированное значение магнитной проницаемости показывает величину мнимой части, равную 0,15 с немного меньшей мнимой частью. Таким образом, показана достаточная стабильность экстрагированных материальных параметров по отношению к действительной части среди одного, двух и четырех слоев метаматериала. Это подтверждает возможность экспериментального создания диамagnetного метаматериала на основе массива металлических кубиков со значением магнитной проницаемости, близкой к 0.

Заключение

В ходе выполнения данной работы была решена задача создания диамagnetного метаматериала со значением магнитной проницаемости $\mu = 0,15$.

Исследована аналитическая модель метаматериала, на основании которой были установлены его изотропные свойства, а также широкий диапазон рабочих частот. Численное моделирование было выполнено в трехмерном пакете численного моделирования CST Microwave Studio.

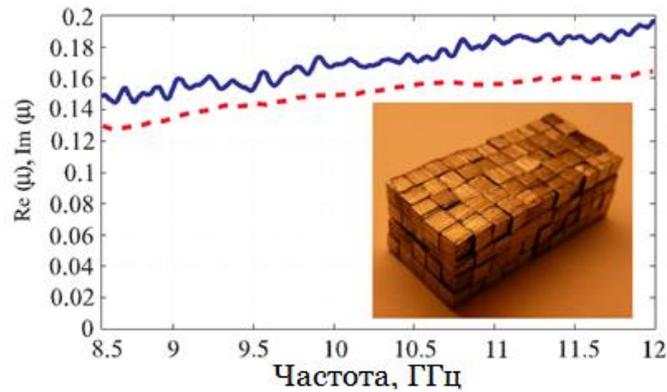


Рис. 6. Магнитная проницаемость, полученная методом экстракции из измеренных данных. Сплошная линия показывает вещественную часть, пунктирная – мнимую

Экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими. Следует отметить, что при более точном изготовлении образца возможно получить более низкий уровень потерь. Полученный результат может быть одним из первых шагов в направлении создания диамagnetиков.

Публикации

1. *Belov P.A., Slobozhanyuk A.P., Filonov D.S., Yagupov I.V., Kapitanova P.V., Simovski C.R., Lapine M., Kivshar Y.S.* Broadband isotropic μ -near-zero metamaterials // *Applied Physics Letters*. 2013. Vol. 103. P. 211903.
2. *Yagupov I.V., Slobozhanyuk A.P., Filonov D.S., Kapitanova P.V., Belov P.A., Lapine M., Simovski C.R., Kivshar Y.S.* Broadband μ -near-zero metamaterial // *Days on diffraction 2013: International Conference, Saint-Petersburg, May 27–31, 2013. Abstracts*. 2013. P. 162–163.
3. *Yagupov I.V., Slobozhanyuk A.P., Filonov D.S., Kapitanova P.V., Belov P.A., Lapine M., Simovski K.R., Kivshar Y.S.* Experimental demonstration of μ -near-zero metamaterial // *2013 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS)*. 2013. P. 1–3.

Литература

1. *Wood B., Pendry J.B.* Metamaterials at zero frequency // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2007. Vol. 19. P. 076208.
2. *Silveirinha M.* Electromagnetic waves in artificial media with applications to lens antennas: PhD thesis. Universidade de Lisboa, Instituto superior técnico, Lisbon, 2003. – 530 p.
3. *Belov P.A., Yankovskaya E.A., Melchakova I.V., Simovski C.R.* Studying the possibility of extracting material parameters from reflection and transmission coefficients of plane wave for multilayer metamaterials based on metal nanogrids // *Optics and Spectroscopy*. 2010. Vol. 109. No 1. P. 85–96.
4. *Ludwig A., Webb K.J.* Accuracy of effective medium parameter extraction procedures for optical metamaterials // *Physical Review B*. 2010. Vol. 81. P. 113103.
5. *Menzel C., Rockstuhl C., Paul T., Lederer F.* Retrieving effective parameters for metamaterials at oblique incidence // *Physical Review B*. 2008. Vol. 77. P. 195328.
6. *Xu Y.Q., Zhou P.H., Zhang H.B., Chen L., Deng L.J.* A wide-angle planar metamaterial absorber based on split ring resonator coupling // *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 110. P. 044102.
7. *Luukkonen O., Maslovski S., Tretyakov A.* A stepwise Nicolson–Ross–Weir-based material parameter extraction method // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2011. Vol. 10. P. 1295–1298.

Сборник трудов студентов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов
Правительства Санкт-Петербурга / Под редакцией проф. В.О. Никифорова. –
СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 178 с.

СБОРНИК ТРУДОВ СТУДЕНТОВ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО,
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА ГРАНТОВ
ПРАВИТЕЛЬСТВА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Под редакцией проф. В.О. Никифорова

Дизайн обложки А.В. Чуркова

Редакторы:

А.В. Бутина, И.А. Лапшина, А.В.Рябчикова

Корректор А.В. Бутина

Верстка: И.А. Лапшина, Е.И. Клейменова

Лицензия ИД № 00408 от 5.11.2013

Подписано в печать2015

Заказ Тираж

ISBN.....