

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



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

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

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2019

Сборник работ аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под. ред. В.О. Никифорова. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 181 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, улучшения качества подготовки специалистов с высшим образованием и формирования резерва для кадров высшей квалификации.



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики, 2019

Авторы, 2019



Победители конкурса грантов из Университета ИТМО на церемонии награждения

Университет ИТМО – один из ведущих вузов Российской Федерации по многим отраслям науки. Он располагает высококвалифицированными научными кадрами и современной научно-исследовательской, инновационной инфраструктурой, которая обеспечивает проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в России. Молодые ученые активно привлекаются к научно-исследовательской деятельности университета.

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, проводимый Комитетом по науке и высшей школе при правительстве Санкт-Петербурга. Аспиранты Университета ИТМО на протяжении восемнадцати лет принимают в нем участие.

Наш университет входит в тройку вузов Санкт-Петербурга по числу поданных заявок и выигранных грантов. Наибольшее число поданных заявок и выигранных аспирантами Университета ИТМО грантов отмечено в 2018 году. Из двухсот пятидесяти четырех поданных заявок было удовлетворено девяносто шесть. Это больше, чем у всех других вузов – участников конкурса.

Совмещение фундаментальных и прикладных исследований и разработок с образовательным процессом служит основой для повышения качества подготовки молодых специалистов и специалистов высшей квалификации.

В настоящий сборник вошли работы аспирантов – победителей конкурса грантов 2018 года для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов Санкт-Петербурга. Представленные работы демонстрируют высокий уровень и широкий диапазон научных исследований, проводимых в университете аспирантами под руководством ведущих ученых.

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



Аксенова Ольга Игоревна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
E-mail: oks280491@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА ЭКСТРУДИРОВАННЫХ КАРТОФЕЛЬНЫХ СНЕКОВ, ОБОГАЩЕННЫХ БЕЛКАМИ И ПИЩЕВЫМИ ВОЛОКНАМИ, В ОДНОШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ

О.И. Аксенова

Научный руководитель – профессор Г.В. Алексеев

В настоящее время в мире в рационе питания населения отмечен недостаток белка и пищевых волокон (неперевариваемых углеводов). Особенно остро проблема дефицита ощущается в мегаполисах, где из-за ускоренного ритма жизни не остается достаточного времени для приготовления полноценных продуктов и потребление снеков (закусочных продуктов), которые удобно использовать в качестве перекуса на ходу, растет. В условиях современного мегаполиса эту проблему можно решить за счет создания снеков с заранее спроектированным составом, сбалансированным по питательным компонентам.

Как показал анализ научных трудов [1–5], существуют проблемы производства экструдированных снеков сбалансированной рецептуры на основе картофеля как одной из наиболее широко возделываемых в нашей стране культур и пищевых отходов лососевых рыб как наиболее ценного белкового сырья, нерационально утилизируемого на рыбоперерабатывающих предприятиях Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Небольшое число проведенных в этой области исследований создает необходимость дальнейшего анализа закономерностей процесса экструзии, а также разработки новых рецептур и способов производства картофельных снеков, отличающихся высокой пищевой ценностью.

Цель работы: исследование процесса экструзии рыборастворительной смеси в одношнековом экструдере и разработка на его основе способа производства экструдированных картофельных снеков, обогащенных белками и пищевыми волокнами.

При этом необходимо решить следующие задачи:

- научно обосновать выбор рецептурного состава смеси для производства биологически полноценных картофельных снеков;
- установить закономерности процесса экструзии рыборастворительной смеси (температуры и давления), а также коэффициента расширения готового продукта от переменных параметров исследуемого процесса в одношнековом экструдере;
- разработать способ производства картофельного снека, обогащенного белками и пищевыми волокнами.

В качестве крахмальной основы для производства снека был выбран картофель (ГОСТ 51808-2013). Обогащение продукта белками осуществлялось за счет побочных продуктов переработки лосося (теши и приголовки) (ГОСТ 7636-85), а обогащение его пищевыми волокнами – за счет сухого свекловичного жома (ГОСТ Р 54901-2012). Для разработки состава рыборастворительной смеси использовалась методика расчета, приведенная в [3]. В результате было получено следующее процентное соотношение выбранных рецептурных ингредиентов «картофель – побочные продукты переработки лосося – сухой свекловичный жом»: 50–31–19 % соответственно. Это позволяет достичь лучших качественных показателей готового продукта: максимальной биологической ценности (88 %) и минимального

содержания жира (3 %). Крахмала в таком продукте более 50 % (67 %), а соотношение белки/углеводы составляет 1/4, что соответствует формуле сбалансированного питания А.А. Покровского [1–4].

Для определения оптимальных режимов экструзии рыборастворительной смеси при производстве картофельных снеков использовался одношнековый экструдер КЭШ-2. По результатам протоколов кинетических исследований были построены графики, представленные на рис. 1, 2.

Распределение температуры по длине рабочей камеры экструдера (рис. 1а) характеризуется ее возрастанием от загрузочной до предматричной зоны, где изменения температуры не происходит. Это связано с относительно небольшой длиной формующего канала и отсутствием внешнего нагрева (автогенный режим работы экструдера). При выходе продукта из матрицы его температура резко снижается из-за мгновенного выделения значительного количества энергии, затрачиваемой на переход влаги, находящейся в смеси, из жидкого состояния в парообразное.

Зависимости, представленные на рис. 1б, позволяют сделать вывод о том, что с увеличением влажности рыборастворительной смеси ее вязкость будет уменьшаться, что приведет к снижению трения и, следовательно, температуры в рабочей зоне экструдера.

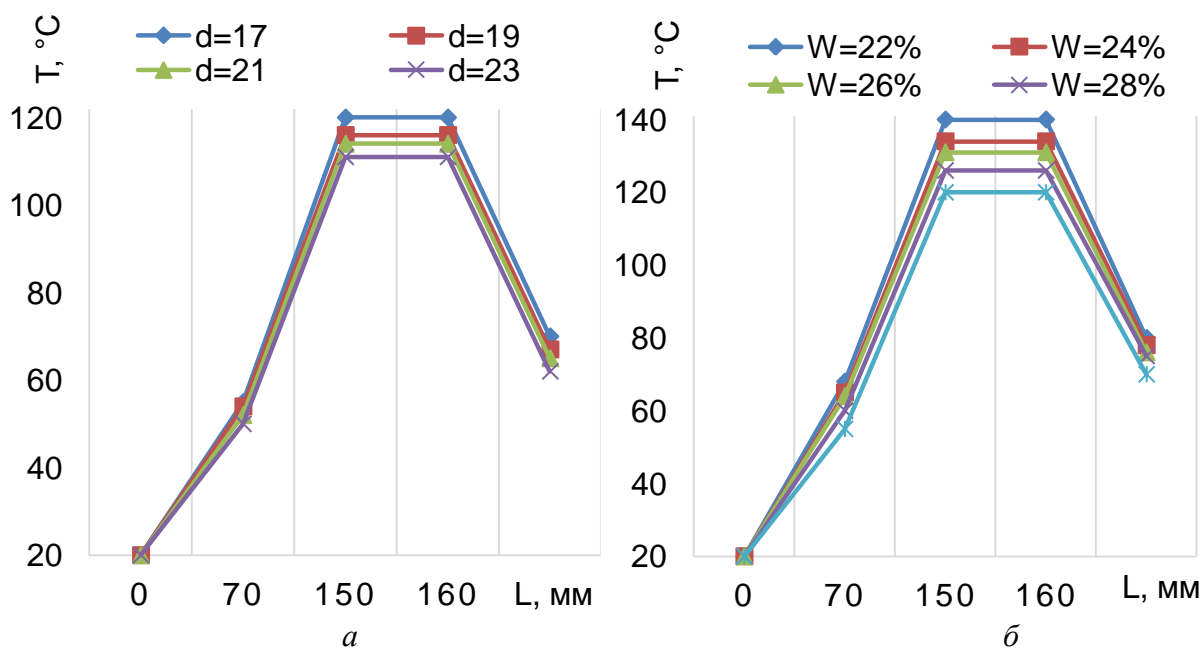


Рис. 1. Зависимость температуры в рабочей камере экструдера от расстояния от загрузочной зоны до зоны декомпрессии: а – при диаметре формующего отверстия $d = 17, 19, 21$ и 23 мм и уровне влажности смеси $W = 23\%$; б – при начальной влажности рыборастворительной смеси $W = 22, 24, 26, 28$ и 30% и диаметре формующего отверстия $d = 23$ мм

Как показано на рис. 2, рост коэффициента расширения снека прямо пропорционален содержанию крахмала в экструдированной смеси благодаря увеличению доли разорвавшихся крахмальных зерен и обратно пропорционален диаметру формующего отверстия за счет уменьшения величины перепада давления между атмосферой и рабочей камерой экструдера.

Проведенные эксперименты позволили определить оптимальные параметры технологического процесса экструзии рыборастворительной смеси, при которых достигаются требуемые основные физические качественные показатели разрабатываемых снеков (наибольший коэффициент расширения $S = 300\%$ и пористая текстура экструдата): влажность рецептурной смеси 28–30 %, температура в предматричной зоне 140–150 $^{\circ}\text{C}$,

частота вращения шнека 10,8 об/с, давление 4,5–5 МПа и площадь сечения формирующего канала $2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

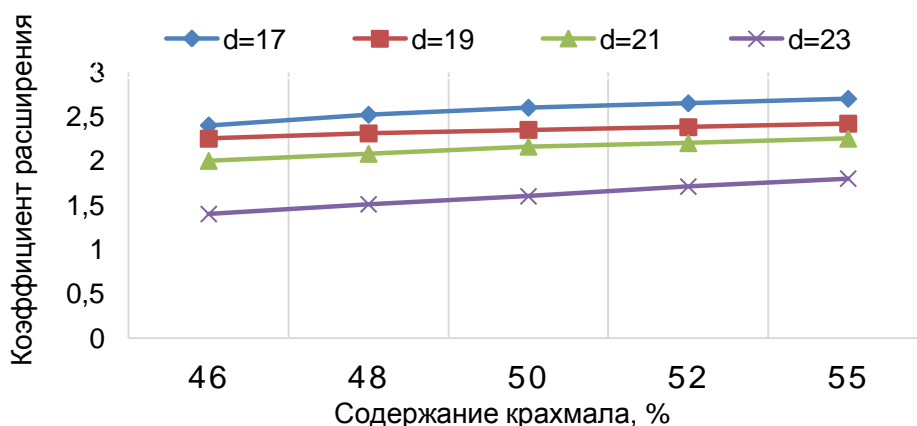


Рис. 2. Зависимость коэффициента расширения экструдата от содержания крахмала в рыбобластительной смеси при диаметре формирующего отверстия $d = 17, 19, 21$ и 23 мм и частоте вращения шнека $n=10,8$ об/с

Далее был разработан способ производства биологически полноценных экструдированных картофельных снеков, согласно которому измельченный и высушенный до 12 % картофель смешивают с фаршем из тешей и приголовков лосося, а также с сушеным свекловичным жомом. Полученную смесь влажностью 28–30 % обрабатывают на одношнековом экструдере при температуре в предматричной зоне 140–150 °С и давлении 4,5–5 МПа. После формования полученный экструдат нарезают на колечки желаемой толщины, высушивают до конечной влажности 10–12 % и охлаждают до комнатной температуры.

Из диаграммы пищевой ценности разрабатываемого снека, представленной на рис. 3, видно, что за счет потребления ста граммов экструдированного рыбно-картофельного снека можно удовлетворить суточную потребность в белках на 15 %, усвояемых углеводах – 13 %, пищевых волокнах – 21 %, калии – 42 %, железе – 27 %, витаминах – 74 %. Использование в качестве дополнительного компонента фарша из пищевых отходов лососевых рыб повышает биологическую ценность снека до 88 %.

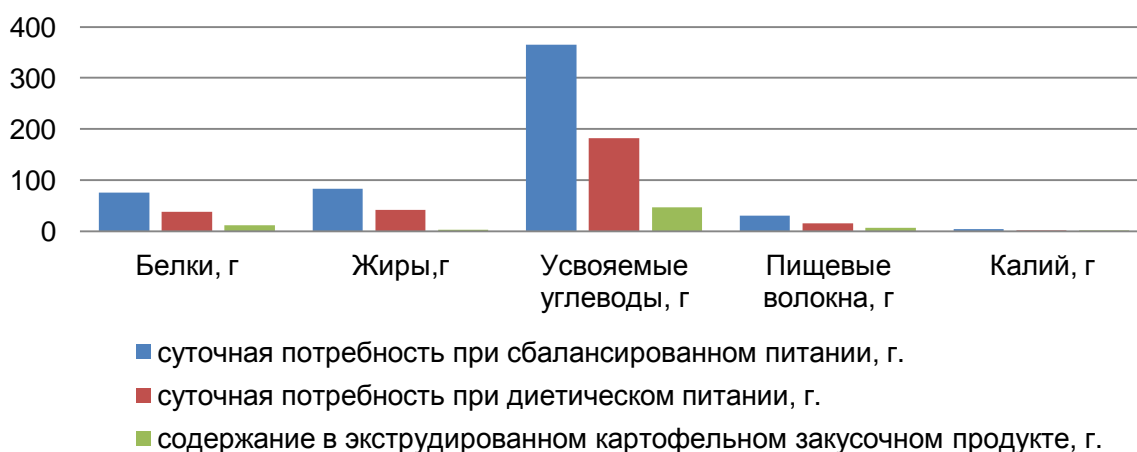


Рис. 3. Диаграмма пищевой ценности экструдированного рыбно-картофельного снека в сравнении с формулой сбалансированного питания ФАО/ВОЗ

Количество килокалорий в ста граммах картофельного снека соответствует 8,6 % от суточной потребности взрослого человека, или 7,9 % – подростка. Низкая калорийность

снека (215 ккал/100 г), по сравнению с картофельными чипсами (500 ккал/100 г), позволяет рекомендовать его в качестве диетического продукта.

Выбранное соотношение рецептурных компонентов придает продукту привлекательный коричневый цвет и мягкий рыбный вкус. Полученный указанным способом биологически полноценный картофельный снек обладает желаемыми для экструдата структурно-механическими свойствами: хорошо развитой равномерной пористостью, высоким коэффициентом расширения, хрупкой структурой и хрустящей текстурой.

К основным выводам и результатам работы относятся следующие утверждения:

– на основании анализа литературы, особенностей культивирования и специфики перерабатывающих производств Санкт-Петербурга и Ленинградской области обоснован выбор и содержание рыборастворительной смеси для производства биологически полноценных картофельных снеков, состоящей на 50 % из сушеного картофеля, на 31 % из побочных продуктов переработки лососевых рыб и на 19 % из сушеного свекловичного жома;

– установлены кинетические закономерности экструзии рыборастворительной смеси:

- зависимость между начальной влажностью смеси давлением и температурой в рабочей камере экструдера обратно пропорциональна;

- коэффициент расширения снека растет прямо пропорционально содержанию крахмала в экструдированной смеси и обратно пропорционален диаметру формирующего отверстия;

- с уменьшением площади проходного сечения формирующего отверстия матрицы экструдера давление и температура в его рабочей зоне увеличиваются.

– разработан способ производства экструдированного картофельного снека, обогащенного белками и пищевыми волокнами, который позволяет решить вопросы:

- импортозамещения снеков за счет расширения их ассортимента в РФ;

- экономически выгодной для Санкт-Петербурга и Ленинградской области утилизации побочных продуктов переработки лососевых рыб;

- снижения дефицита белка и пищевых волокон в рационе питания населения мегаполисов.

Исследование показало целесообразность внедрения в производство данного продукта, а также необходимость конструирования новых линий для производства экструдированных снеков в Российской Федерации.

На полученный в результате исследования картофельный снек, обогащенный белками и пищевыми волокнами, получен патент РФ № 2626582 «Натуральный экструдированный пищевой закусочный продукт».

Данная работа может быть использована предприятиями Санкт-Петербурга и Ленинградской области, занимающимися выпуском экструдированных снеков, для оптимизации режимов экструзии рыборастворительных смесей, улучшения количественных и качественных характеристик рецептурной смеси снеков на основе картофеля, снижения затрат на их внедрение.

Публикации

1. Аксенова О.И., Куликова М.Г. Обоснование технологических решений при производстве продуктов питания повышенной биологической ценности // Агропродовольственная экономика. 2017. № 6. С. 40–48.

2. Аксенова О.И. и др. Эмпирическое исследование зависимости коэффициента экспандирования картофельных экструдатов от функционально-технологических свойств полуфабрикатов // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 8–13.

3. Аксенова О.И. и др. Влияние тепловой обработки на функциональные свойства рыбных фаршей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 1. С. 107–112.

4. *Аксенова О.И. и др.* Эмпирическое определение технологических параметров процесса производства монокомпонентных расширенных экструдированных картофельных снеков [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/6816/6816.pdf> (дата обращения: 10.05.2018).
5. *Aksenova O.I. et al.* From traditional recipes to biologically complete food products: review on snacks extrusion // *RJOAS: Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2017. № 12 (72). P. 349–353.
6. *Аксенова О.И. и др.* Способ производства снеков из картофеля // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск, 2018. С. 602–606.
7. Пат. 2626582 Российская Федерация. Натуральный экструдированный пищевой закусочный продукт / О.И. Аксенова и др. Опубл. 28.07.2017.

Литература

1. *Ненахов Р.В.* Разработка и научное обоснование способа производства экструдированных картофелепродуктов, обогащенных белковыми добавками: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2001. – 192 с.
2. *Напольских М.С.* Научное обоснование способа производства растительно-мясных экструдатов в двухшнековом экструдере: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2013. – 232 с.
3. *Остриков А.Н. и др.* Кокструзионные продукты: новые подходы и перспективы. М., 2009. – 232 с.
4. *Василенко В.Н.* Разработка и научное обоснование способа получения экструдированных гороховых палочек с белковой добавкой: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2003. – 189 с.
5. *Alam M.S. et al.* Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. Vol. 56. No 3. P. 445–473.



Алексеева Мария Сергеевна
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
E-mail: alexeevams@mail.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ СЕНСОРНОГО ПРОФИЛЯ ПШЕНИЧНОГО КВАСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

М.С. Алексеева

Научный руководитель – доцент П.Е. Баланов

В ходе работы были решены такие задачи, как выявление влияния соотношения светлого и темного пшеничного солодов на внешний вид и сенсорный профиль продукта. Также учитывалось влияние норм засева дрожжей и молочнокислых бактерий для брожения на органолептические и физико-химические характеристики кваса. В зависимости от

желаемого результата регулированием данных технологических факторов можно добиться получения светлого и темного пшеничного кваса, характеризующегося различными сенсорными параметрами. При этом исключается применение различных консервантов, усилителей вкуса и других искусственных добавок. Полученные напитки обладают следующими характеристиками: мягким сладковатым вкусом с умеренной кислотностью и слабовыраженным приятным ароматом с тонкой фруктовой нотой для светлого кваса и приятным вкусом с умеренной кислотностью, а также терпким кофейным послевкусием и приятным, выразительным кофейным ароматом для темного кваса. Пшеничный квас обладает отличными функциональными свойствами: прекрасно утоляет жажду, улучшает работу желудочно-кишечного тракта, за счет наличия пребиотических веществ и пробиотических микроорганизмов, нормализует артериальное давление и в целом оказывает общеукрепляющее действие.

Цель проекта – регулирование сенсорного профиля пшеничного кваса технологическими параметрами.

В ходе выполнения работы было определено влияние технологических параметров на качество пшеничного кваса. Решены задачи по подбору наиболее оптимальной рецептуры и состава кваса, выбран штамм и нормы засева микроорганизмов.

В качестве сырья использовались: светлый пшеничный солод, обладающий высокой экстрактивностью и низким содержанием белка, а также темный неферментированный пшеничный солод. Ориентируясь на уже разработанную технологию, получены образцы кваса из светлого и темного неферментированного пшеничного солода с приятным уникальным вкусовым профилем, но значительно отличающиеся друг от друга. На рис. 1 представлен пшеничный квас с различным количественным соотношением светлого и темного неферментированного солода по мере увеличения засыпи темного солода (слева направо). В качестве эталона приготовлен светлый пшеничный квас из стопроцентной засыпи светлого солода [1–3].



Рис. 1. Образцы пшеничного кваса с различным количественным соотношением светлого и темного солода: от стопроцентной засыпи светлого солода до 100 % засыпи темного неферментированного солода (слева направо)

Как видно на рис. 1, визуально квасы различаются по насыщенности цвета: от светло-соломенного до насыщенного коричневого. По результатам органолептической оценки, с увеличением количества темного солода в засыпи усиливаются кофейный аромат, отсутствующий у первых двух образцов, и терпкость в послевкусии. Используемые штаммы молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus fermenti* и *Lactobacillus brevis*

являются одним из основополагающих факторов для формирования сенсорного профиля. В ходе исследования выявлено, что напитки, полученные при помощи *Lactobacillus brevis*, обладали неспецифичным, неприятным ароматом, пустым послевкусием и избыточным пенообразованием.

Оптимальными образцами с точки зрения дегустационной оценки были выбраны квасы из 100 % засыпи светлого пшеничного солода и 75 % засыпи темного пшеничного солода и 25 % светлого, сброженные при помощи бактерий *Lactobacillus plantarum* или *Lactobacillus fermenti* [1, 3, 4].

Сравнение сенсорного профиля двух образцов приведено на рис. 2.

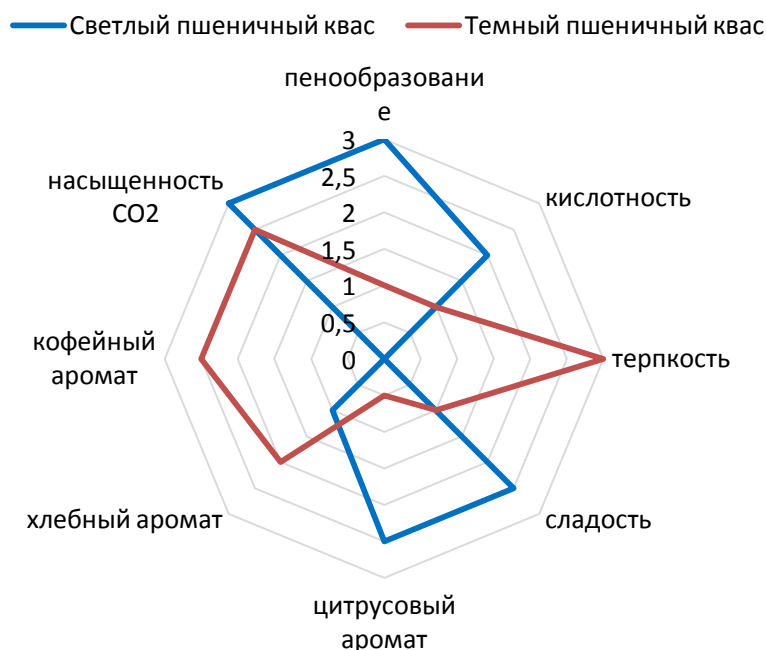


Рис. 2. Сравнение сенсорного профиля светлого и темного пшеничного кваса

Ввиду того что в бродильной промышленности количество дрожжей существенно меняет интенсивность брожения и качественные характеристики готового продукта, следующим этапом стал подбор оптимальной нормы засева дрожжей и молочнокислых бактерий. Диапазон подбора: от 1,5 до 11 млрд дрожжевых клеток и от 4 до 30 млрд клеток молочнокислых бактерий (*Lactobacillus plantarum* или *Lactobacillus fermenti*) на один литр напитка. При увеличении нормы засева дрожжевых клеток наблюдается увеличение пенообразования с фонтанированием напитка, появляется горечь в послевкусии, низкое накопление кислотности и высокие показатели спирта (до 2 % об.), что недопустимо по ГОСТ 31494-2012. Повышение нормы засева молочнокислых бактерий ведет к более быстрому затуханию спиртового брожения, а следовательно, к более низким показателям спирта, отсутствию или малому количеству CO₂, повышению кислотности и приятному слабо выраженному аромату.

Оптимальное соотношение норм засева для пшеничного кваса: 3 млрд клеток дрожжей и 14 млрд клеток молочнокислых бактерий на один литр напитка. При соблюдении данных рекомендаций физико-химические показатели готового продукта зафиксированы в следующих пределах: объемная доля спирта 0,5–0,6 %, среднее количество CO₂ 0,3–0,33 %, кислотность 6,5–7 к. ед. При этом органолептическую оценку кваса можно описать следующими характеристиками: мягким сладковатым вкусом с умеренной кислотностью и слабовыраженным приятным ароматом с тонкой фруктовой нотой для светлого кваса и приятным вкусом с умеренной кислотностью, терпким кофейным послевкусием и приятным сильно выраженным кофейным ароматом для темного кваса [1, 5].

Заключение

На данном этапе выполнен ряд следующих задач:

- определено влияние норм засева дрожжей и молочнокислых бактерий на качественные характеристики кваса;
- выявлены оптимальные нормы засева микроорганизмов на брожение;
- определено влияние содержания темного неферментированного пшеничного солода на сенсорный профиль и внешний вид напитка.

Ведется работа в направлении увеличения срока хранения напитка для привлечения потребителей и облегчения дальнейших исследований, в частности разработки линейки продукции с использованием сахарозаменителей и получения более точных результатов микробиологических и хроматографических анализов. Кроме того, предусматривается разработка технологии получения концентрата темного и светлого пшеничного кваса для выпуска продукта массово, без привязки к специфическому сырью и дорогому оборудованию.

Полученный в лабораторных условиях продукт, воссозданный по старинным рецептурам, увеличит ассортимент безалкогольных напитков, произведенных из натуральных ингредиентов. В его составе отсутствуют синтетические консерванты, искусственные красители и усилители вкуса. Из группы потребителей придется исключить только больных целиакией, то есть обладающих непереносимостью глютена.

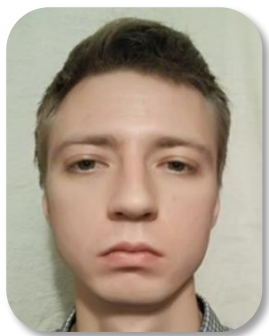
Уникальность игристого пшеничного кваса обусловлена его составом и органолептическими характеристиками (сбалансированным приятным кисловатым вкусом со слабовыраженным ароматом, в котором различимы легкие цитрусовые нотки) [1, 2].

Публикации

1. Алексеева М.С. Перспективы использования темного пшеничного солода для производства кваса // Вестник студенческого научного общества. 2018. Т. 1. № 9. С. 232–233.
2. Алексеева М.С. Побочные продукты метаболизма молочнокислых бактерий и дрожжей в пшеничном квасе // Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2017. С. 10–12.
3. Алексеева М.С. Разработка рецептуры и технологии кваса из пшеничного сырья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. № 10 (121). С. 151–155.
4. Алексеева М.С. Сравнение сенсорных и физико-химических свойств кваса из пшеничного и ржаного сырья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (138). С. 273–277.
5. Alekseeva M.S. Development of technology of wheat kvass // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. СПб., 2016. Т. 1. С. 20–22.

Литература

1. Алексеева М.С. Перспективы использования темного пшеничного солода для производства кваса // Вестник студенческого научного общества. 2018. Т. 1. № 9. С. 232–233.
2. Алексеева М.С. Разработка рецептуры и технологии кваса из пшеничного сырья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. № 10 (121). С. 151–155.
3. Помозова В.А. Производство кваса и безалкогольных напитков: учебное пособие. СПб., 2006. – 192 с.
4. Захарова А.В., Масловский С.А. Технологическая оценка видов хлебных квасов, произведенных по различным технологиям // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 3-1. С. 80–83.
5. Алексеева М.С. Сравнение сенсорных и физико-химических свойств кваса из пшеничного и ржаного сырья // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (138). С. 273–277.



Анохин Александр Сергеевич
Факультет низкотемпературной энергетики
E-mail: asanokhin@corp.ifmo.ru

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА НИОБАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

А.С. Анохин

Научный руководитель – доцент О.В. Пахомов

В работе исследовано влияние примесей гадолиния и церия на электрофизические и магнитные свойства керамики на основе твердого раствора ниобата бария-стронция. Показано, что легирование малыми дозами церия и гадолиния приводит к незначительному снижению диэлектрической проницаемости и температуры фазового перехода, а также к небольшому изменению величины спонтанной поляризации. В то же время повышение дозы гадолиния (более 1 %) приводит к резкому росту намагниченности керамики, наблюдаемому как при криогенных температурах, так и вблизи комнатной температуры.

Цель проекта – экспериментальное исследование керамических материалов на основе твердых растворов ниобата бария-стронция $\text{Sr}_{0,7}\text{Ba}_{0,3}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN70), легированных различными концентрациями гадолиния и церия.

Задачи:

- синтез исследуемых керамических сегнетоэлектрических материалов;
- анализ электрофизических свойств изготовленных образцов, включая температурные и полевые зависимости поляризации, температурные зависимости диэлектрической проницаемости и теплового отклика, обусловленного электрокалорическим эффектом;
- исследование полевой и температурной зависимостей намагниченности в изготовленных керамических образцах.

Наиболее широко распространенные в науке и технике сегнетоэлектрические материалы, такие как титанат бария или магнониобат свинца (титанат свинца), обладают рядом недостатков (для некоторых – это наличие свинца, для других – узкие рабочие диапазоны температур). Поэтому задача поиска новых сегнетоэлектрических материалов и исследование влияния на их свойства легирующих добавок является весьма актуальной [1]. Не меньший интерес представляет исследование технологии создания искусственных мультиферроидных сред, характеризующихся наличием электрических и магнитных доменов. Одним из перспективных сегнетоэлектрических материалов является ниобат бария-стронция (SBN), он характеризуется достаточно выраженной нелинейностью диэлектрических свойств, оптической прозрачностью, технологичностью [2, 3] и способностью образовывать твердые растворы с магнитными металлами [4].

В соответствии с поставленными задачами были изготовлены керамические образцы на основе твердого раствора SBN-70, стехиометрия материалов приведена в Таблице.

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости нелегированного образца и образцов с различными концентрациями добавки гадолиния приведены на рис. 1.

Таблица
Состав и обозначение синтезированных материалов

| Обозначение | Стехиометрия |
|------------------|--|
| 0,7SBN | $\text{Sr}_{0,7}\text{Ba}_{0,3}\text{Nb}_2\text{O}_6$ |
| 0,7SBN – 1 %Gd | $\text{Sr}_{0,69}\text{Gd}_{0,01}\text{Ba}_{0,3}\text{Nb}_2\text{O}_6$ |
| 0,7SBN – 5 %Gd | $\text{Sr}_{0,65}\text{Gd}_{0,05}\text{Ba}_{0,3}\text{Nb}_2\text{O}_6$ |
| 0,7SBN – 0,2 %Ce | $\text{Sr}_{0,698}\text{Gd}_{0,002}\text{Ba}_{0,3}\text{Nb}_2\text{O}_6$ |

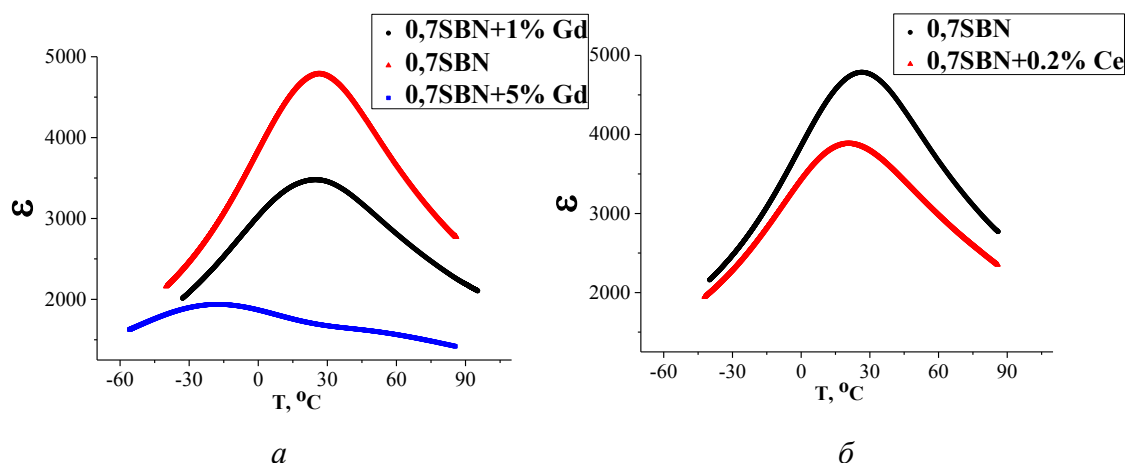


Рис. 1. Влияние добавок гадолиния (а) и церия (б) в твердый раствор на температурную зависимость диэлектрической проницаемости SBN

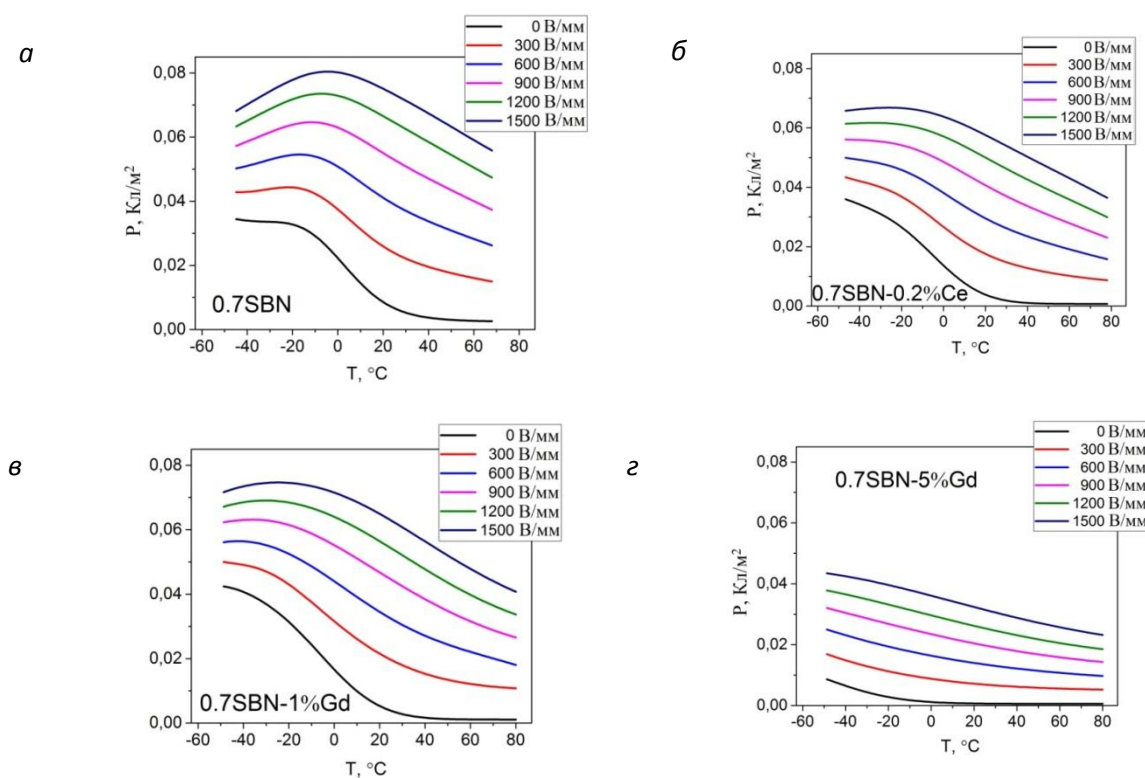


Рис. 2. Температурные зависимости поляризации исследованных керамических образцов

С помощью схемы Сойера – Тауэра при различных температурах были измерены полевые зависимости поляризации образцов $P(E)$, пересчитанные затем в температурные зависимости поляризации $P(T)$ (рис. 2). Из приведенных данных следует, что при легировании ниобата бария-стронция гадолинием и церием происходит заметное размытие фазового перехода, особенно выраженное в случае добавления церия. Эти изменения в свою очередь сказываются на характере температурной зависимости теплового отклика (в исследованных диапазонах изменения напряженности поля). Значительное снижение температуры фазового перехода в случае добавления 5 % гадолиния может быть компенсировано изменением стехиометрии исходного твердого раствора SBN.

Ввиду отсутствия существенного влияния легирующих добавок на поляризацию прямые измерения теплового отклика, обусловленного электрокалорическим эффектом, выполнялись лишь для образцов на основе 0,7SBN и 0,7SBN – 5 %Gd (рис. 3).

При измерении теплового отклика величина изменения напряженности ΔE составляла 4 В/мкм, а форма сигнала представляла собой меандр.

Для оценки магнитных свойств синтезированных материалов с помощью СКВИД-магнитометров были выполнены измерения температурной и полевой зависимостей намагниченности образцов. На рис. 4 показаны температурные зависимости нелегированного и легированного 5 (пятью) мол.% гадолиния ниобата бария-стронция при различных величинах индукции внешнего магнитного поля.

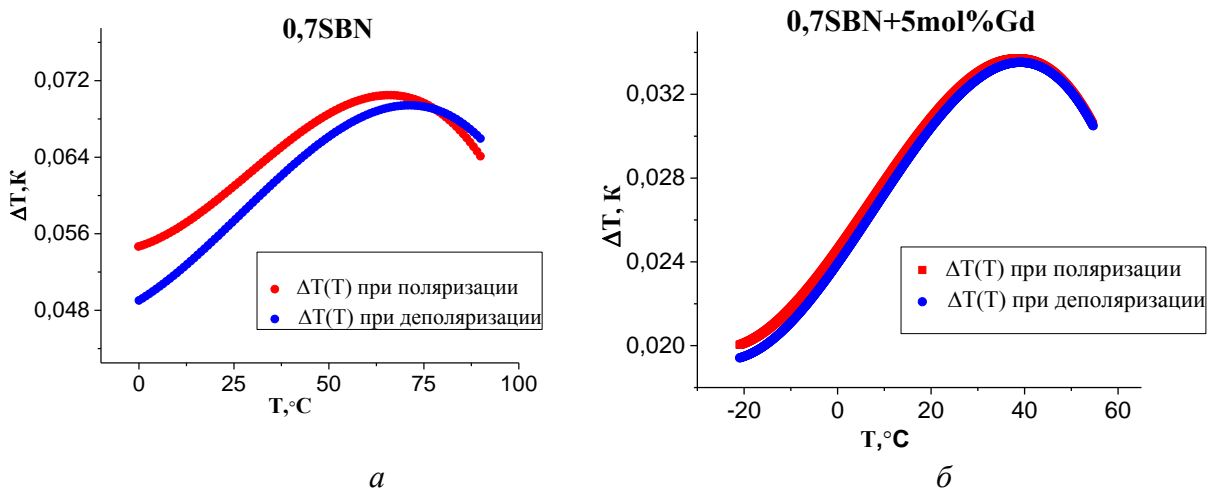


Рис. 3. Температурные зависимости величины адиабатного изменения температуры в образцах на основе SBN70 (а) и SBN70 – 5 %Gd (б)

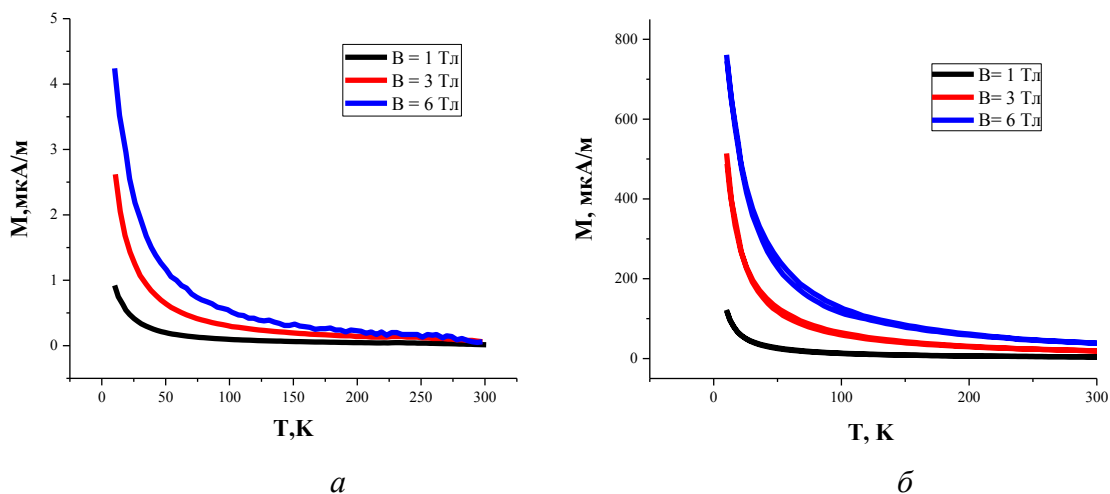


Рис. 4. Температурные зависимости величины намагниченности образцов на основе SBN70 (а) и SBN70 – 5 %Gd (б) при индукции 1–6 Тл

Из приведенных зависимостей следует, что намагниченность керамики при легировании увеличивается на два порядка. Это особенно заметно в области криогенных температур. На рис. 5 приводится температурная зависимость намагниченности образцов с различным содержанием гадолия при индукции внешнего магнитного поля, равной 1 Тл, а также полевая зависимость намагниченности образца 0,7SBN – 5 %Gd.

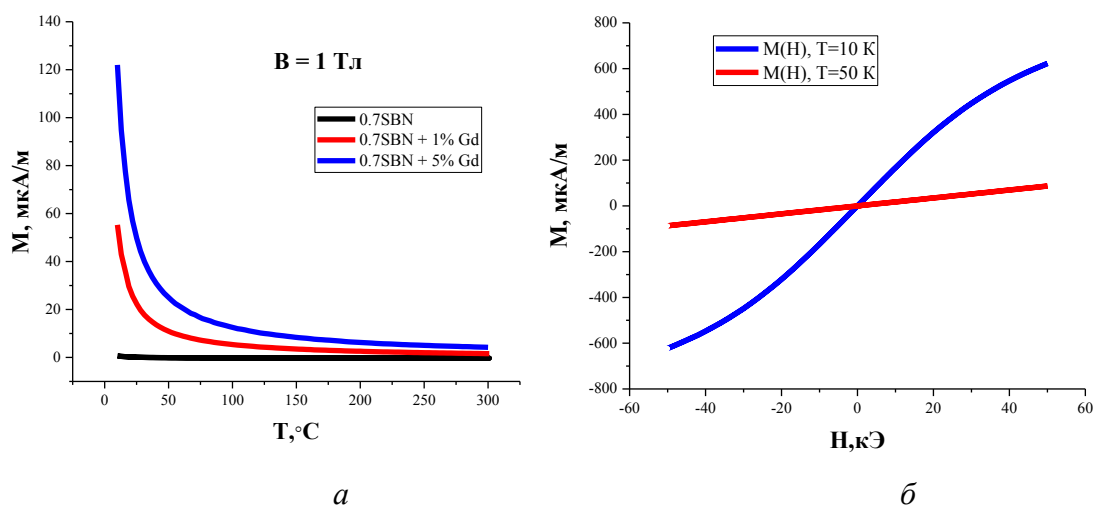


Рис. 5. Температурные зависимости величины намагниченности образцов с различными концентрациями гадолия при индукции 1 Тл (а), а также полевая зависимость намагниченности образца SBN70 – 5 %Gd при температурах 10 и 50 К (б)

На рис. 5б видно, что при температуре 10 К поведение зависимости $M(H)$ имеет нелинейный характер, что может косвенно свидетельствовать о существовании фазового перехода в ферромагнитное состояние при более низких температурах. Такое поведение намагниченности связано с появлением в легированном твердом растворе таких фаз, как ниобат гадолия, а также гадолинаты стронция и бария [4, 5].

Таким образом, можно утверждать, что легированный гадолинием ниобат бария-стронция сохраняет характерные сегнетоэлектрические свойства (полевой гистерезис поляризации, электрокалорический эффект), однако при этом приобретает нехарактерную для сегнетоэлектрических материалов величину намагниченности, наблюдаемую даже при достаточно высоких температурах. Все это позволяет предположить, что ниобат бария-стронция, легированный высокими дозами гадолия (более 1 %), может обладать мультиферроидными свойствами.

Публикации

Anokhin A.S. *et al.* Investigation of the electrocaloric effect in strontium barium niobate (SBN) ceramics with rare-earth dopants // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1038. No 1. P. 012115.

Литература

1. Volk T. R. *et al.* Ferroelectric properties of strontium barium niobate crystals doped with rare-earth metals // *Physics of the Solid State*. 2000. Vol. 42. No 11. P. 2129–2136.
2. Cheong S.W., Mostovoy M.V. Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity // *Nature materials*. 2007. Vol. 6. No 1. P. 13.
3. Bowen C.R. *et al.* Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications // *Energy & Environmental Science*. 2014. Vol. 7. No 12. P. 3836–3856.
4. Qu Y.Q. *et al.* Structure and electrical properties of strontium barium niobate ceramics // *Materials Research Bulletin*. 2002. Vol. 37. No 3. P. 503–513.

5. Wang F.F.Y., Gravel R.L. Magnetic and electrical properties of NdNbO₄ and GdNbO₄ // *Physica Status Solidi (B)*. 1965. Vol. 12. No 2. P. 609–612.
6. Chaker H. et al. Rietveld refinement of the gadolinium strontium oxide SrGd₂O₄ // *Powder Diffraction*. 2003. Vol. 18. No 4. P. 288–292.



Антипов Денис Сергеевич
Факультет информационных технологий и программирования
E-mail: antipovden@yandex.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МУТАЦИИ *HEAVY-TAILED* НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ *XdivK*

Д.С. Антипов

Научный руководитель – доцент М.В. Буздалов

В настоящем проекте были получены теоретические оценки на время работы (1+1)-эволюционной стратегии, использующей непредвзятые операторы мутации, на последнем плато функции *XdivK*. Согласно полученным данным, использование любого непредвзятого оператора мутации не может изменить время работы алгоритма более чем в константу раз, если вероятность того, что оператор мутации переключит ровно один бит, является положительной константой, не зависящей от размера задачи.

Цель проекта – разработка метода анализа эволюционных алгоритмов на плато и поиск наиболее эффективных операторов мутации.

Задачи:

- разработать метод анализа эволюционных алгоритмов на плато;
- применить его для анализа эволюционных стратегий на примере задачи *XdivK*;
- на основе полученных результатов выявить наиболее эффективные алгоритмы для прохождения плато целевой функции.

Основные сложности, с которыми сталкиваются эволюционные алгоритмы [1] при решении задач оптимизации, связаны с выходом из локальных оптимумов и прохождением плато. Локальный оптимум – это точка пространства поиска, у которой есть некоторая окрестность, где нет другой точки с лучшим значением функции. Эта проблема уже достаточно хорошо изучена, в том числе и с теоретической точки зрения, и существуют различные рекомендации по тому, какие операторы мутации следует использовать в эволюционных алгоритмах, чтобы ее избежать [1].

Плато – это область пространства поиска, в которой значение целевой функции постоянно. Проблема плато не так хорошо изучена, так как прохождение эволюционного алгоритма через него часто является более сложным стохастическим процессом, чем выход из локального оптимума.

В данной работе был проведен анализ (1 + 1)-эволюционной стратегии на последнем плато функции *XdivK*. С этой целью процесс прохождения плато был представлен с помощью двух различных цепей Маркова: цепью индивидов и цепью фитнес-уровней.

Первая очень сложна для анализа из-за большого числа состояний, равного $\frac{n^k}{k!} (1 + o(1))$. Однако ее матрица переходов является симметричной и, следовательно, ее собственные векторы, соответствующие разным собственным числам, ортогональны.

Цель фитнес-уровней имеет всего k состояний, но при этом ее матрица переходов не симметрична. Однако была сформулирована и доказана следующая лемма о спектре этой матрицы переходов.

Лемма. Спектр матрицы переходов цепи фитнес-уровней вещественен, его наибольшее по модулю собственное число есть $1 - O\left(\frac{1}{n}\right)$, а остальные собственные числа меньше, чем $1 - \varepsilon$ для некоторой положительной константы ε .

После доказательства леммы был получен определенный базис из собственных векторов матрицы переходов цепи фитнес-уровней. Также было доказано, что собственный вектор этой матрицы, соответствующий наибольшему собственному значению, является вектором равномерного распределения по плато с точностью до членов младшего порядка.

Данные наблюдения позволили доказать главный результат работы.

Теорема. Математическое ожидание времени работы $(1 + 1)$ -эволюционной стратегии, использующей непредвзятый оператор мутации, при прохождении последнего плато функции $XdivK$ есть:

$$E[T] = \frac{n^k}{k! p} (1 \pm o(1)),$$

где p – это вероятность того, что непредвзятый оператор мутации переключает ровно один бит, n – размер особи, а k – радиус плато.

Из данной теоремы следует, что использование различных непредвзятых операторов мутации не может улучшить время работы алгоритма более чем в константу раз.

После доказательства теоремы она была применена к $(1 + 1)$ -эволюционной стратегии с различными операторами мутации для сравнения их эффективности. Хотя по теореме у всех вариантов алгоритма будет одинаковое асимптотическое время работы $O(n^k)$, наиболее интересным является определение алгоритмов с лучшей ведущей константой. Результаты сравнения представлены в Таблице.

Таблица

Сравнение ожидаемого времени работы $(1 + 1)$ -эволюционной стратегии с различными операторами мутации

| Оператор мутации | Ведущая константа |
|---|--|
| Локальный поиск (мутация ровно одного бита) | $\frac{n^k}{k!} (1 + o(1))$ |
| Стандартная битовая мутация | $\frac{n^k}{k! e^{-\gamma} \sum_{i=1}^k \gamma^i / i!} (1 + o(1)),$ Лучшее значение интенсивности мутации $\gamma = \sqrt[k]{k!} \approx k/e$ |
| Мутация <i>heavy-tailed</i> [1] | $C_{k,n} \frac{n^k}{k!},$ где $C_{k,n} \in \left[\frac{1}{H_{k,\beta}} o(1), \frac{1}{H_{k,\beta}} + 1 \right], H_{k,\beta}$ – гармоническое число общего вида |

Из Таблицы видно, что наилучшим оператором мутации является самый простой – локальный поиск, так как вероятность переключить нужное число битов у него равна

единице. Однако *heavy-tailed* оператор мутации не сильно ему уступает. Следовательно, применение его на практике по сравнению с более простыми операторами предпочтительнее, так как он не уступает им при прохождении плато, но имеет преимущество при выходе из локальных оптимумов.

В результате проведенного исследования:

- разработан новый метод анализа эволюционных алгоритмов на плато;
- проведено сравнение эволюционных стратегий с различными операторами мутации при прохождении последнего плато функции *XdivK*.

Публикации

Antipov D.S., Doerr B. Precise runtime analysis for plateaus // Parallel Problem Solving from Nature – PPSN XV: Conference Proceedings. Part II. Cham, 2018. P. 117–128.

Литература

Doerr B. et al. Fast genetic algorithms // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '17). New York, 2017. P. 777–784.



Беляев Михаил Евгеньевич
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: belyaevmihail@mail.ru

АЛГОРИТМЫ АДАПТАЦИИ С УСКОРЕННОЙ СХОДИМОСТЬЮ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЕМ «ВОЗДУХ – ТОПЛИВО» ДЛЯ ИНЖЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.Е. Беляев

Научный руководитель – доцент Д.Н. Герасимов

В работе рассмотрена задача ускорения сходимости оценок неизвестных параметров при управлении соотношением «воздух – топливо», которая повышает общее быстродействие системы. В свою очередь, поддержание состава топливовоздушной смеси на оптимальном уровне позволяет одновременно повысить экологические и экономические показатели двигателя. Решение строится на основе метода динамического расширения регрессора.

Цель работы – ускорить сходимость оценок неизвестных параметров в системе стабилизации соотношения «воздух – топливо».

Соотношение «воздух – топливо» характеризует состав смеси в цилиндре. Для бензинового двигателя стехиометрическое соотношение равно 14,7:14,7 весовых частей воздуха к одной части топлива. При поддержании такой пропорции обеспечивается полное сгорание смеси, то есть не будет образовываться излишнего углекислого газа и оксидов азота. Текущий состав смеси измеряется с помощью кислородочувствительных датчиков (λ -зонды), устанавливаемых в выпускном коллекторе. Оптимальное соотношение достигается

регулированием количества топлива, впрыскиваемого в цилиндр. Рассчитать необходимое его количество напрямую не представляется возможным, так как при впрыскивании часть топлива оседает на стенках впускного коллектора, образуя топливную пленку, которая испаряясь, попадает в цилиндр при последующих тактах. На рис. 1 проиллюстрирован этот процесс. Массу и параметры испарения топливной пленки измерить невозможно, поэтому для впрыскивания нужного количества топлива необходимо создать регулятор, который на основании текущего значения соотношения «воздух – топливо» будет оценивать указанные неизвестные параметры и организовывать требуемую подачу топлива.

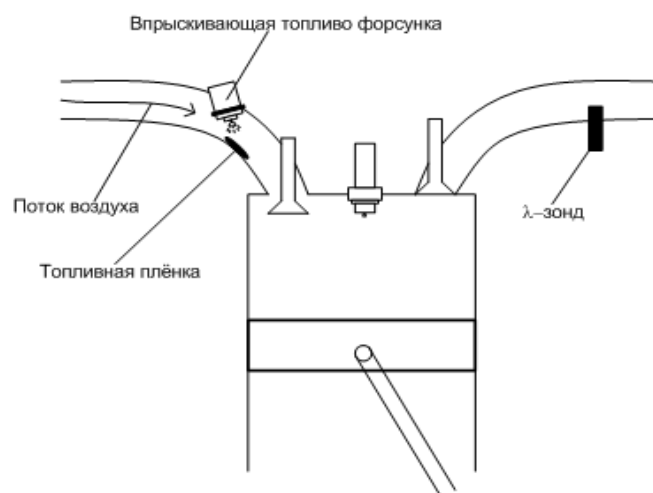


Рис. 1. Образование топливовоздушной смеси

Существующие решения обычно реализованы на большом наборе ПИД-регуляторов, коэффициенты которых рассчитаны в лабораторных условиях при длительной калибровке. При изменении рабочей точки двигателя контур управления замыкается через соответствующий регулятор. Точно настроенный ПИД-регулятор обеспечивает высокую точность управления в своей рабочей точке. Однако при износе деталей двигателя необходимо производить повторную настройку. Существуют решения, в которых для автоматической настройки регулятора используются нейронные сети. Для построения таких систем требуется большое количество экспериментальной информации для обучения сети, что усложняет процесс первичной настройки. Наличие параметрических неопределенностей объекта управления мотивирует к использованию методов адаптивного управления. В данной работе рассматривается улучшение полученной ранее адаптивной системы управления с целью увеличения скорости сходимости ее оценок.

Управление соотношением производится путем изменения массы впрыскиваемого топлива. Поэтому для синтеза регулятора рассматривается модель «топливо – воздух»:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -\frac{1}{T}x(t) + \frac{K}{T}u(t) \\ y(t) = \frac{F_s}{m_{ac}(t)}(x(t) + (1-K)u(t)) \end{cases},$$

где $x(t)$ – масса топливной пленки, T – параметр динамики ее испарения, K – часть топлива, оседающего на стенках коллектора, $u(t)$ – масса впрыскиваемого топлива, $y(t)$ – нормированное соотношение «топливо – воздух», F_s – стехиометрическое соотношение, $m_{ac}(t)$ – масса воздуха в цилиндре [1].

Определим модель ошибки как разницу между желаемым значением регулируемой переменной и текущим:

$$e(t) = y^*(t) - y(t),$$

где y^* – желаемое значение. Так как необходимо стабилизировать нормированную переменную, то $y^*(t) = 1, \forall t \geq 0$.

Задача ставится следующим образом: требуется обеспечить сходимость ошибки $e(t)$ к нулю при компенсации параметрических неопределенностей объекта управления.

Для представления модели ошибки в виде линейной регрессии преобразуем модель объекта управления к виду:

$$y(t) = \frac{F_s}{m_{ac}(t)} \cdot \frac{b_1 s + b_0}{s + a_0} u(t),$$

где a_0, b_0, b_1 – неизвестные параметры. Затем применим устойчивый фильтр $H(s) = \frac{1}{s + \lambda}$, $\lambda > 0$ к левой и правой части выражения, чтобы найти $y(t)$:

$$y(t) = (\lambda - a_0) \frac{1}{s + \lambda} y(t) + \frac{F_s}{m_{ac}(t)} b_1 u(t) - \frac{F_s}{m_{ac}(t)} (b_1 \lambda - b_0) \frac{1}{s + \lambda} u(t).$$

Подставим полученное выражение в модель ошибки:

$$e(t) = \frac{F_s}{m_{ac}(t)} b_1 \left(\frac{m_{ac}(t)}{F_s b_1} - \frac{m_{ac}(t)(\lambda - a_0)}{F_s b_1} \frac{1}{s + \lambda} y(t) + \frac{(b_1 \lambda - b_0)}{b_1} \frac{1}{s + \lambda} u(t) - u(t) \right).$$

Для более компактной записи введем обозначения:

$$\theta = \text{col} \left(\frac{1}{b_1}, \frac{a_0 - \lambda}{b_1}, \frac{b_1 \lambda - b_0}{b_1} \right),$$

$$\omega(t) = \text{col} \left(\frac{m_{ac}(t)}{F_s}, \frac{m_{ac}(t)}{F_s} \cdot \frac{1}{s + \lambda} y(t), \frac{1}{s + \lambda} u(t) \right).$$

Тогда управляющий сигнал вида $u(t) = \theta^T \omega(t)$ обеспечит равенство ошибки нулю.

В адаптивном регуляторе вместо параметров используются их оценки, которые формируются алгоритмом адаптации. Для рассматриваемой модели ошибки часто применяется градиентный алгоритм:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \omega e,$$

где $\hat{\theta}$ – оценки неизвестных параметров, γ – положительный коэффициент, определяющий скорость алгоритма. Такой алгоритм обеспечивает асимптотическую сходимость ошибки к нулю и сходимость оценок к значениям параметров. Однако существует некоторое значение коэффициента γ , при котором достигается максимально возможная скорость сходимости оценок. Также на скорость сходимости влияет наличие неисчезающего возбуждения в системе. При его отсутствии оценки могут сходиться крайне долго. Поэтому необходим алгоритм адаптации, компенсирующий указанные недостатки. Решением является динамическое расширение регрессора [2].

Введем в рассмотрение оператор с одним входом и k выходами:

$$L(s) = \text{col}(L_1(s), \dots, L_k(s)),$$

где k – размерность вектора регрессии ω , а $L_i(s)$ – устойчивые операторы, в качестве которых можно использовать апериодические звенья с различными коэффициентами передачи и постоянными времени.

Применим оператор $L(s)$ к регрессору и ошибке для формирования следующих компонентов:

$$W = \text{row}(L_1\{\omega\}, \dots, L_k\{\omega\}),$$

$$E = L\{e\}.$$

Формировать оценки неизвестных параметров будем с помощью следующего алгоритма:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma WE.$$

Скорость сходимости алгоритма может произвольно регулироваться путем изменения коэффициента γ . Также в условиях отсутствия неисчезающего возбуждения алгоритм продолжит идентификацию параметров за счет механизма динамического расширения. Доказательства данных утверждений приводятся в публикациях.

На рис. 2 представлены результаты моделирования рассматриваемого объекта управления при использовании градиентного алгоритма и алгоритма с динамическим расширением. Переходной процесс градиентного алгоритма обозначен пунктирной линией, а сплошная соответствует алгоритму с динамическим расширением. В момент времени 4 с симулируется скачкообразное изменение функции $m_{ac}(t)$. Из графиков видно, что предложенный алгоритм обеспечивает сходимость ошибки к нулю за меньшее время, а также быстрее перенастраивается при изменении сигнала $m_{ac}(t)$.

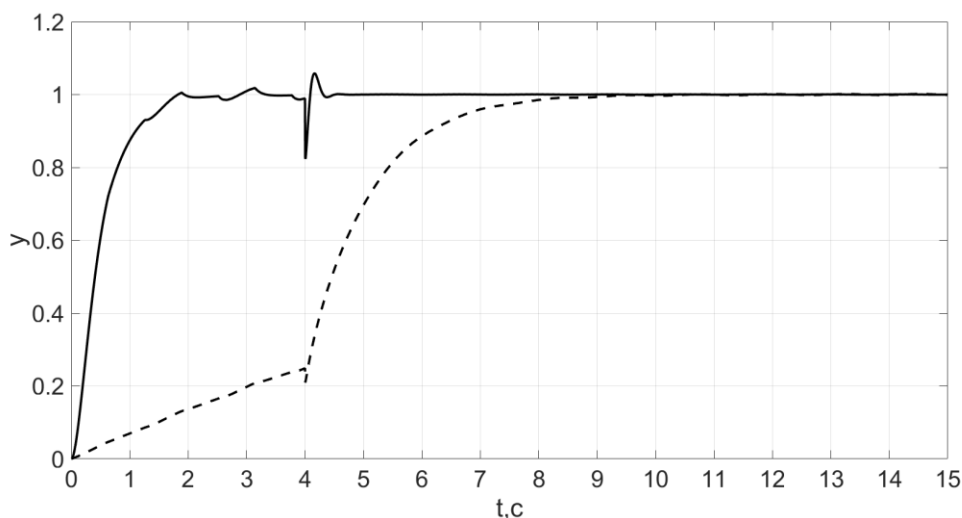


Рис. 2. Результаты моделирования замкнутой системы

Заключение

В ходе выполнения данной работы была решена задача ускорения сходимости оценок в адаптивной системе управления соотношением «воздух – топливо».

Рассмотрена модель формирования топливовоздушной смеси, на основе которой разработан адаптивный регулятор, стабилизирующий текущее соотношение «воздух – топливо» на стехиометрическом уровне.

С помощью метода динамического расширения был модифицирован градиентный алгоритм адаптации, обеспечивающий высокую скорость сходимости и работоспособность в условиях отсутствия неисчезающего возбуждения. Преимущества предложенного алгоритма проиллюстрированы в результатах математического моделирования. Дальнейшие исследования будут сфокусированы на дискретных моделях.

Публикации

1. *Беляев М.Е. и др.* Алгоритм адаптивного управления по выходу линейной системой с улучшенной параметрической сходимостью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5. С. 771–779.
2. *Belyaev M.E. et al.* Inverse adaptive air-fuel ratio control in spark ignition engines // European Control Conference (ECC). Aalborg, 2016. P. 1253–1258.

Литература

1. *Aquino C.F.* Transient A/F control characteristics of the 5 liter central fuel injection engine // SAE Technical Paper 810494. 1981. P. 6–10.
2. *Aranovskiy S.V. et al.* Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62. No 7. P. 3546–3550.



Богданов Николай Николаевич
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
E-mail: nnbogdanov@corp.ifmo.ru

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СРЕДЫ С ОБЪЕМНЫМ РАССЕЯНИЕМ

Н.Н. Богданов

Научный руководитель – доцент И.С. Потемин

Исследование посвящено разработке метода восстановления рассеивающих свойств шероховатой поверхности, под которой в данном случае понимается граница раздела «диэлектрик – воздух». Обычно эти свойства описываются с помощью двунаправленной функции рассеивания. Прямое измерение таких функций либо невозможно, либо его стоимость очень высока. Метод восстановления двунаправленной функции рассеивания, основанный на распределении высот микрорельефа, требует сложной процедуры подгонки и зачастую дает не очень хорошие результаты. В предлагаемом решении шероховатая поверхность моделируется параметрической функцией эмулирующей плотность распределения нормалей к граням микрорельефа поверхности. Результат ее оптимизации хорошо согласуется с ожидаемым.

Цель проекта – разработка методов оптимизации параметров шероховатой поверхности для восстановления физически-корректной двунаправленной функции рассеивания света (ДФР) в задачах моделирования рассеивающих оптических элементов.

При этом решаются следующие задачи:

- определение оптимальных функций оптимизации ДФР;
- проверка согласованности результатов моделирования и измерений на сертифицированном измерительном оборудовании.

Светопроводящие оптические элементы с шероховатыми поверхностями широко применяются в приборах со сложным распространением света. Как правило, шероховатые

поверхности применяют в двух случаях: для формирования специальной гониометрической диаграммы рассеивания светового излучения, либо для создания требуемого пространственного распределения яркости в различных светопроводящих приборах (СПП).

Параметры рассеяния света шероховатой поверхности описываются ДФР, которая имеет сложное многомерное представление и зависит от множества параметров, таких как направление падения и наблюдения света, спектральный состав (цвет) излучения [1].

Главная проблема состоит в том, что ДФР шероховатой поверхности СПП не может быть измерена напрямую. Этому есть несколько причин. Во-первых, это наличие многократных отражений между шероховатой поверхностью и другими поверхностями измеряемого образца. Во-вторых, невозможность осветить образец или детектировать свет под скользящими углами к шероховатой поверхности. Решение этих проблем дорогостоящее и требует специального оборудования.

Решением проблемы восстановления ДФР занимаются многие исследователи [2]. В некоторых работах сравниваются результаты моделирования ДФР с результатами ее измерений из базы данных *MERL BRDF* [3]. Однако информация об используемом сертифицированном измерительном оборудовании отсутствует, поэтому возникает вопрос о достоверности результатов измерений.

В связи с этим актуальна разработка таких способов восстановления ДФР, которые позволяют физически корректно моделировать сложные сцены освещения с использованием матированного стекла.



Рис. 1. Алгоритм процедуры оптимизации восстановления ДФР

Основная идея предлагаемого оптимизационного метода состоит в том, что для восстановления искомой ДФР шероховатой поверхности достаточно использовать только один набор измеренных данных, например характеристик пропускания всего образца, или,

другими словами, его двунаправленную функцию пропускания (ДФП). На рис. 1 представлен алгоритм процедуры оптимизации.

Важной особенностью данного метода является то, что при восстановлении ДФР параметром оптимизации является распределение плотности нормалей к микрограням поверхности. Однако это определение не подходит для большинства оптимизационных инструментов, поскольку многопараметрические процедуры требуют очень много расчетного времени. Наиболее удобным представлением закона распределения является аналитическая функция с минимальным числом параметров. Эксперименты позволили выявить два наиболее подходящих в данном случае типа базовых функций: гауссообразную и кошиобразную. Для большинства случаев распределение Коши дает более хороший результат, хотя для некоторых микрорельефов предпочтительнее приближение Гаусса. Аппроксимация по Гауссу хорошо согласуется с измерениями ДФП в зонах с высокой прозрачностью (по крайней мере, с точки зрения среднеквадратичного отклонения между результатами моделирования и измерения). Поэтому в процессе оптимизации разумно использовать оба типа функций. Общий вид функций Гаусса и Коши представлен на рис. 2. Хорошо видно, что распределение Коши шире в зонах дальних углов. Параметр θ_0 , соответствующий сдвигу пика распределения вдоль оси углов, является довольно формальным, поскольку в большинстве случаев плотность распределения нормалей имеет максимум при $\theta_0 = 0$. Однако он зарезервирован для улучшенной оптимизации.

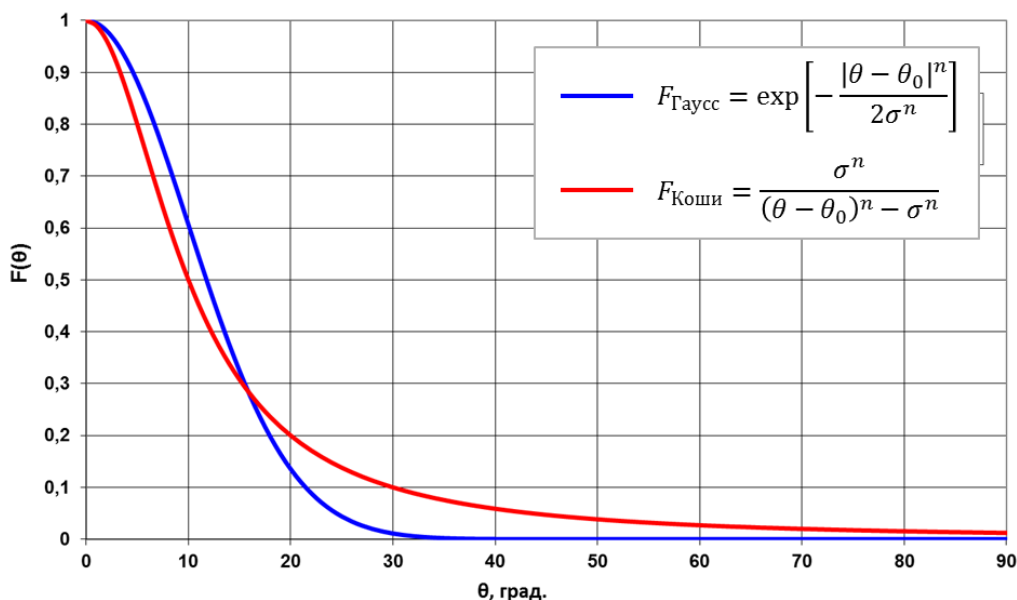


Рис. 2. Функции плотности распределения

Учитывая то, что общее табличное представление функции плотности распределения нормалей не является хорошим решением для оптимизации, было выбрано альтернативное гибридное решение. Базовая функция плотности распределения нормалей может быть задана гауссообразной или кошиобразной, в то время как некоторые области функции могут быть заменены на локально табличные.

Краткое описание алгоритма.

1. Предположим, что процедура оптимизации с аналитической функцией плотности распределения нормалей не может соответствовать ДФР в области, близкой к нулевому углу θ . Это означает, что плотность распределения нормалей в этой области должна быть представлена табличной функцией.

2. Оптимизатор добавляет несколько точек в табличное представление плотности распределения нормалей в этой области и продолжает оптимизацию смешанной функции. Если число добавленных точек не высоко, процедура оптимизации может найти решение.

В ходе исследования достигнуты следующие цели:

- разработан метод оптимизации плотности углового распределения нормалей для восстановления ДФР;
- выявлено, что в большинстве случаев использование кошиобразной функции оптимизации ДФР показывает гораздо лучшие результаты ее восстановления, чем метод восстановления ДФР по измеренному микрорельефу;
- установлена альтернативная функция оптимизации ДФР – гауссообразная функция, которая может обеспечить более высокую скорость сходимости оптимизируемой ДФР к целевому значению;
- решена задача об исключении измерений микропрофиля для точного восстановления ДФР.

Публикации

Bogdanov N.N. et al. Reconstruction of BSDF based on optimization of microrelief normal distribution // ГрафиКон 2017: 27-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению. Пермь, 2017. Т. 1. С. 37–41.

Литература

1. *Seylan N. et al.* BRDF reconstruction using compressive sensing // 21st International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision. Plzen, 2013. Vol. 2. P. 88–94.
2. *Antensteiner D., Štolc S.* Full BRDF reconstruction using CNNs from partial photometric stereo-light field data // Workshop on Light Fields for Computer Vision at ECCV–2017. Honolulu, 2017. Vol. 1. P. 13–21.
3. MERL BRDF Database [Electronic resource]. URL: <http://www.merl.com> (accessed: 10.03.2018).



Васильева Анна Владимировна
Факультет прикладной оптики
E-mail: avasileva@corp.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА И КОДИРУЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ

А.В. Васильева

Научный руководитель – доцент В.А. Рыжова

Научный проект направлен на исследование и разработку системы визуализации ионизирующего излучения. Разработана структурная схема системы. В качестве детектора использован Si-ФЭУ и сцинтиллятор CsI(Tl), спектральная совместимость которых обоснована расчетами. Изображение формируется кодирующей апертурой. Показаны теоретические аспекты ее функционирования, методы реализации, алгоритм восстановления

изображений. Продемонстрированы результаты эксперимента на разработанном стенде в видимой области спектра.

Целью настоящего проекта является исследование и разработка системы визуализации ионизирующего излучения (СВИИ) на основе неорганического сцинтиллятора и кодирующей апертуры с применением комплексирования информации, получаемой с твердотельного кремниевого фотоэлектронного умножителя (*Si-ФЭУ*) и оптического сенсора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ литературного материала и результатов существующих актуальных исследований в области формирования изображения источников ионизирующего излучения;
- разработать принципиальную структурную схему СВИИ;
- провести энергетический расчет детектора ионизирующего излучения для подтверждения спектральной совместимости *Si-ФЭУ* и сцинтиллятора;
- выполнить математическое моделирование процесса формирования изображения с помощью кодирующей апертуры;
- разработать экспериментальный стенд и провести исследования функционирования кодирующей апертуры в видимом диапазоне спектра.

Существующие аналоги СВИИ используют в качестве детекторов радиационные счетчики, вакуумные фотоумножители (ФЭУ), матричные (ПЗС и КМОП) приемники излучения, а также трекинговые детекторы *Medipix* [1]. Кремниевый фотоумножитель (*Si-ФЭУ*) представляется более перспективным для данной задачи, поскольку, помимо высокой чувствительности и малых габаритов, обладает рядом эксплуатационных преимуществ, таких как нечувствительность к магнитным полям и низкое энергопотребление. Возможности применения *Si-ФЭУ* для визуализации γ -излучения пока недостаточно изучены, однако такие исследования уже проводятся зарубежными учеными [2].

Разработанная структурная схема СВИИ показана на рис. 1.

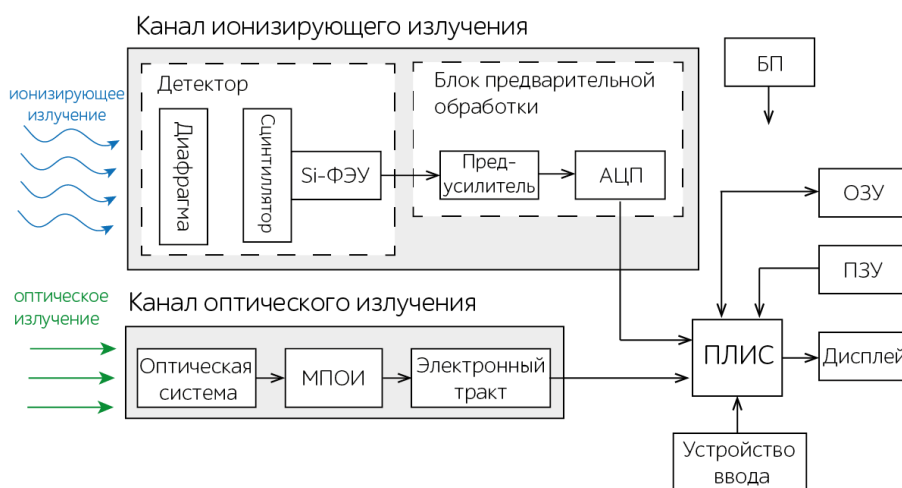


Рис. 1. Структурная схема СВИИ:

Si-ФЭУ – кремниевый фотоэлектронный умножитель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; БП – блок питания; МПОИ – матричный приемник оптического излучения; ПЛИС – программируемая интегральная схема; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

СВИИ формирует изображение, соответствующее пространственному распределению источника ионизирующего излучения, и осуществляет пространственную привязку этого распределения к местности. Такой подход предоставляет возможность локализовать источник излучения в большом заданном объеме пространства, тем самым обеспечивая высокую наглядность и позволяя оперативно реагировать в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

Основным критерием выбора Si-ФЭУ является его спектральная чувствительность, максимум которой должен быть согласован с пиковой длиной волны сцинтиллятора. На основе анализа рынка Si-ФЭУ с подходящими характеристиками был выбран Array J-30035-16P-PCB фирмы Sensl. В качестве сцинтиллятора использован йодид цезия CsI(Tl), который обладает высоким световыходом и временным разрешением. Энергетический расчет показал, что Si-ФЭУ использует излучение CsI(Tl) на 56,1 %, на основании чего можно сделать вывод об их удовлетворительной спектральной совместимости.

В ходе работы над проектом было проведено исследование формирования изображения кодирующей апертурой в канале ионизирующего излучения. Этот процесс иллюстрируется рис. 2.

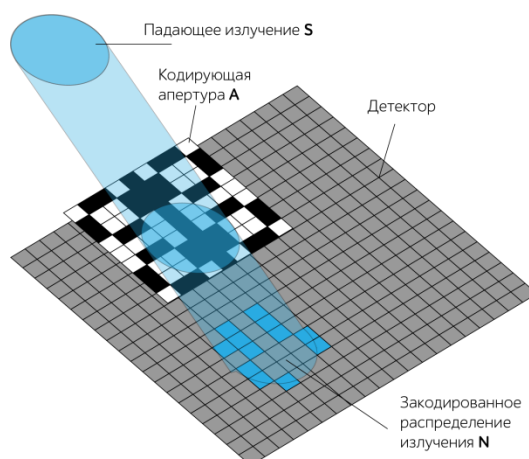


Рис. 2. Принцип действия кодирующей апертуры

Излучение, имеющее пространственное распределение S , проходит через кодирующую апертуру, представленную в виде двумерной матрицы A , элементы которой равны либо 0 (непрозрачный), либо 1 (прозрачный). В результате в плоскости детектора излучения образуется так называемая тенеграмма N , которая представляет собой закодированное изображение источника. Восстановленное изображение источника I можно получить путем математической обработки тенеграммы N , а именно ее свертки с матрицей декодирования G :

$$I = N * G = (S * A) * G.$$

Матрица декодирования G соответствует матрице апертуры A , являясь ее корреляционной инверсией. Оператор $*$ означает циклическую двумерную свертку, в ходе которой каждый элемент $I(x, y)$ изображения I вычисляется следующим образом:

$$I(x, y) = \sum_{u=0}^{N_1-1} \sum_{v=0}^{N_2-1} N(u, v) G(x-u, y-v),$$

где N_1, N_2 – размер изображений I, N, G по горизонтали и вертикали соответственно. На практике эта операция реализуется через дискретное преобразование Фурье:

$$I = \text{Re} \left[F^{-1} \left(\hat{N} \circ \hat{G} \right) \right],$$

где \hat{N}, \hat{G} – Фурье-образы изображений N и G соответственно, \circ – произведение Адамара, F^{-1} – операция обратного преобразования Фурье.

Существует несколько вариантов конфигурации кодирующей апертуры, при этом для любой из них справедливы представленные соотношения. В разрабатываемой СВВИ

используется маска типа *MURA* (*Modified Uniformly Redundant Array*) [3], которая проста в реализации и универсальна.

Для проведения экспериментального исследования кодирующая апертура ранга 59 была реализована с помощью лазерной печати. Изображение, сформированное кодирующей апертурой, фиксировалось КМОП-матрицей и затем обрабатывалось персональным компьютером. Разработанный экспериментальный стенд показан на рис. 3.

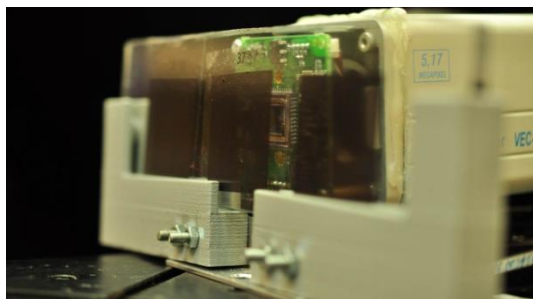


Рис. 3. Экспериментальный стенд для исследования функционирования кодирующей апертуры

В качестве изображаемого объекта использовалась лампа, излучающая в широком спектральном диапазоне, совместно с фигурной диафрагмой (рис. 4б). Изображение объекта (тенеграмма), зафиксированное КМОП-матрицей, показано на рис. 4в, а соответствующее ему изображение, восстановленное путем обработки с использованием операции свертки – на рис. 4г.

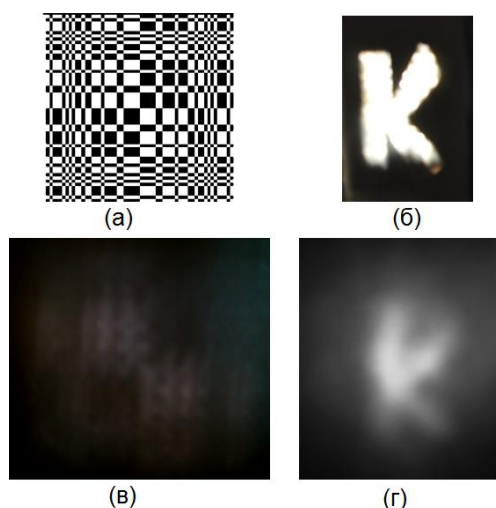


Рис. 4. Экспериментальное исследование кодирующей апертуры:
а – кодирующая апертура ранга 59; б – изображаемый объект;
в – зафиксированная тенеграмма; г – восстановленное изображение

По результатам эксперимента видно, что кодирующая апертура полностью передает очертания изображаемого объекта. Для повышения контраста и резкости изображения целесообразно повысить качество изготавливаемой кодирующей апертуры.

Результат комплексирования изображений, полученных с помощью линзовой системы и кодирующей апертуры, приведен на рис. 5.

Таким образом, результаты экспериментального исследования кодирующей апертуры подтверждают функционирование алгоритма формирования и восстановления изображений.

В процессе работы над проектом были достигнуты следующие результаты:

- проведен анализ актуальных исследований в области визуализации источников ионизирующего излучения;
- разработана принципиальная структурная схема СВВИ;

- расчетным путем подтверждена спектральная совместимость Si-ФЭУ и сцинтиллятора CsI(Tl);
- разработана и исследована математическая модель формирования изображения с помощью кодирующей апертуры;
- разработан экспериментальный стенд и проведено исследование кодирующей апертуры в видимой области спектра, реализовано комплексирование изображений, полученных линзовой оптической системой и кодирующей апертурой.

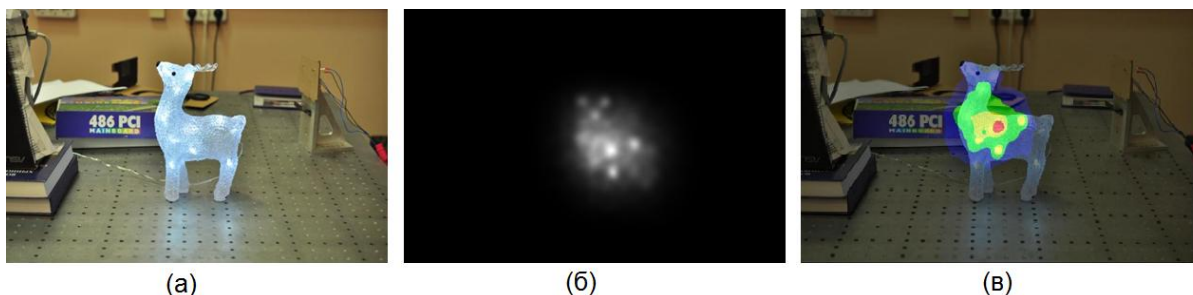


Рис. 5. Реализация метода комплексирования: а – изображение, полученное линзовой оптической системой; б – кодирующей апертурой; в – комплексированное изображение

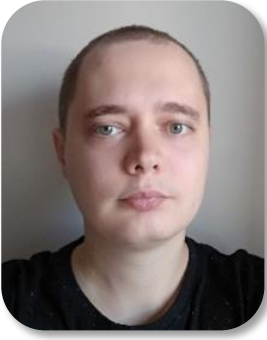
Результаты научного проекта могут быть использованы в системах безопасности для предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с радиоактивным излучением; в экологическом мониторинге для проведения планового радиационного картирования местности, в промышленности. Также актуальным является применение СВВИ в системах безопасности для предотвращения радиационного терроризма, а также хищения радиоактивных веществ и материалов.

Публикации

Vasileva A.V., Vasilev A.S. Research and development of a high-energy radiation imaging system based on SiPM and coding aperture // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10796. P. 107960N.

Литература

1. Мартынюк Ю.Н., Вишневский И.Б. Промышленный прототип портативной гамма камеры для применения на объектах атомной энергетики // АНРИ. 2016. № 4 (87). С. 13–23.
2. Wang Y. et al. Development of a portable gamma imager based on SiPM and coded aperture technology // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). San Diego, 2015. P. 1–3.
3. Gottesman S.R., Fenimore E.E. New family of binary arrays for coded aperture imaging // Applied Optics. 1989. Vol. 28. No 20. P. 4344–4352.



Гайдаш Андрей Алексеевич
Факультет фотоники и оптоинформатики
E-mail: andrei_gaidash@corp.ifmo.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЙ-ЛОВУШЕК В СИСТЕМЕ КВАНТОВОЙ КОММУНИКАЦИИ НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ МОДУЛИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. Гайдаш

Научный руководитель – профессор С.А. Козлов

В статье продемонстрирован метод применения состояний-ловушек, снижающий вероятность полного различения квантовых состояний в системе квантовой коммуникации на боковых частотах. Состояния-ловушки формируются путем выключения фазового модулятора без изменения амплитуды центральной частоты.

В системе квантовой коммуникации на боковых частотах [1] используются неортогональные квантовые состояния, которые могут быть однозначно различены. В статье приводятся аргументы эффективности применения дополнительного состояния-ловушки, которое снижает вероятность полного различения двух сигнальных состояний.

Найдем вероятность полного различения состояний для двух сигнальных состояний ($\varphi_A \in \{0, \pi\}$), равномерно распределенных на фазовой плоскости с равными априорными вероятностями. Следуя [2], рассмотрим грамиан M , представленный в виде:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \exp(-\mu_0(1 - d_{00}^S(2\beta))) \\ \exp(-\mu_0(1 - d_{00}^S(2\beta))) & 1 \end{bmatrix},$$

где μ_0 – среднее число фотонов в центральной моде, $d_{00}^S(2\beta)$ – d -функция Винера связывающая $2S + 1$ мод. Аргумент β может быть найден как:

$$\cos \beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{S + 0.5} \right)^2,$$

где m – индекс модуляции. Следуя [2], вероятность полного различения состояний определяется в следующем виде и линейна по μ – среднему числу фотонов на боковых частотах в квантовом канале:

$$P = \min(\text{eigenvalue}(M)) = 1 - \exp\left(-\mu_0(1 - d_{00}^S(2\beta))\right) \approx 2\mu.$$

Теперь рассмотрим грамиан для двух сигнальных и одного добавочного вакуумного состояния. Положим, что последнее состояние-ловушка – добавочное – уменьшает вероятность полного различения сигнальных состояний злоумышленником. Вакуумное состояние-ловушка с измененным средним числом фотонов на центральной моде и нулевым индексом модуляции имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \exp(-\mu_0(1 - d_{00}^S(2\beta))) & \exp\left(-\frac{\mu_0}{2} - \frac{\tilde{\mu}_0}{2} + \sqrt{\tilde{\mu}_0\mu_0}d_{00}^S(\beta)\right) \\ \exp(-\mu_0(1 - d_{00}^S(2\beta))) & 1 & \exp\left(-\frac{\mu_0}{2} - \frac{\tilde{\mu}_0}{2} + \sqrt{\tilde{\mu}_0\mu_0}d_{00}^S(\beta)\right) \\ \exp\left(-\frac{\mu_0}{2} - \frac{\tilde{\mu}_0}{2} + \sqrt{\tilde{\mu}_0\mu_0}d_{00}^S(\beta)\right) & \exp\left(-\frac{\mu_0}{2} - \frac{\tilde{\mu}_0}{2} + \sqrt{\tilde{\mu}_0\mu_0}d_{00}^S(\beta)\right) & 1 \end{bmatrix}$$

где $\tilde{\mu}_0$ – среднее число фотонов в центральной моде для состояния-ловушки. Поскольку состояния-ловушки обладают гораздо меньшей априорной вероятностью по сравнению с сигнальными, нельзя следовать [2]. Вместо этого проанализируем более общую задачу оптимизации, следуя [3]. Для этого необходимо рассмотреть положительно определенное измерение (POVM) вида $\sum_i \hat{A}_i = \hat{I}$, где i пробегает значения от нуля до числа рассматриваемых состояний, \hat{A}_i содержит вероятности различить каждое из состояний и \hat{A}_0 содержит вероятности не различить каждое из состояний. В [3] утверждается, что комбинация вероятностей различения для состояний должна удовлетворять условию $\det(\hat{A}_0) = 0$. Таким образом, необходимо решить оптимизационную проблему вида:

$$\begin{cases} P = \max((1 - p)S + pV) \\ f(S, V) = \det(\hat{A}_0) = 0 \\ 0 \leq S \leq 1 \\ 0 \leq V \leq 1 \end{cases}$$

где S – вероятность различить сигнальное состояние, V – вероятность различить состояние-ловушку, $p \ll 1$ – априорная вероятность послать состояние-ловушку. Решая данную задачу и минимизируя найденное максимальное значение P по $\tilde{\mu}_0$, получаем:

$$P = 1 + \exp\left(-\mu_0(1 - d_{00}^S(2\beta))\right) - 2 \exp\left(-\mu_0 - \tilde{\mu}_0 + 2\sqrt{\tilde{\mu}_0\mu_0}d_{00}^S(\beta)\right) \approx \mu^2.$$

Исходя из условия $\mu < 1$, видно, что добавление состояния-ловушки снижает вероятность различения сигнальных состояний.

Таким образом, в работе продемонстрирован метод применения состояний-ловушек, снижающий вероятность полного различения. Состояния-ловушки формируются путем выключения фазового модулятора без изменения амплитуды центральной частоты, поскольку $d_{00}^S(\beta) \approx 1$.

Литература

1. *Miroshnichenko G. P. et al.* Security of subcarrier wave quantum key distribution against the collective beam-splitting attack // *Optics Express*. 2018. Vol. 26. No 9. P. 11292–11308.
2. *Chefles A.* Unambiguous discrimination between linearly independent quantum states // *Physics Letters A*. 1998. Vol. 239. No 6. P. 339–347.
3. *Peres A., Terno D.R.* Optimal distinction between non-orthogonal quantum states // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 1998. Vol. 31. No 34. P. 7105.



Глеб Константин Андреевич
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: kostya_gleb@mail.ru

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХМЕРНОГО МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ, ВЫПОЛНЕННЫМ ВОЛНОМЕРНЫМИ БУЯМИ

К.А. Глеб

Научный руководитель – профессор Д.Г. Грязин

Приведены результаты исследования применения методов оценки спектральных характеристик трехмерного морского волнения по измерениям, выполненным волномерными буюми. Рассмотрен классический метод представления пространственного спектра, предложенный М. Лонге-Хиггинсом и В.В. Свешниковым, и особенности его применения. Проанализированы альтернативные методы оценки пространственного спектра волнения, ставшие развитием классического метода, описаны их достоинства и недостатки. Предложено направление дальнейшего исследования.

Цель проекта – анализ применения методов оценки спектральных характеристик трехмерного морского волнения по измерениям, выполненным волномерными буюми.

Задачи проекта:

- исследовать современное состояние и особенности применения методов оценки двумерных спектров трехмерного волнения по измерениям, выполненным волномерными буюми, описать основные положения классической теории М. Лонге-Хиггинса и В.В. Свешникова, особенности применения этого метода и его эволюцию на современном этапе;
- исследовать альтернативные методы описания, их достоинства и недостатки;
- предложить направление дальнейшего исследования.

Известно, что волнение представляет собой полигармонический процесс, в котором наряду с ветровыми волнами присутствуют волны зыби. Последние могут иметь направление движения, не совпадающее с направлением ветровых волн. Измерение спектральных характеристик подобного волнения необходимо для определения направления движения как одних, так и других волн. Получение этой информации важно в связи с тем, что энергия таких волн может иметь разрушающие значения, и знание направления их распространения является критически важным. Помимо этого, измерение спектральных характеристик трехмерного волнения связано с решением задач прогнозирования для обеспечения безопасности береговых сооружений и морской техники.

Основная идея спектрального метода описания заключается в том, что морская поверхность представляется как суперпозиция плоских регулярных волн (спектральных составляющих) с разными высотами, периодами и направлениями распространения. Графическое изображение такого представления приведено на рис. 1.

Математическая модель трехмерного волнения определяется выражением:

$$\zeta(x, y, \theta, \tau) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij} \cos(k_i x \cos \theta_j + k_i y \sin \theta_j - \omega_i \tau + \varphi_{ij}),$$

где x, y – пространственные координаты, θ – географическое направление бега волн, τ – время, n – количество волн для суммирования, m – количество направлений бега волн, A – амплитуда волны, k – волновое число, ω – круговая частота, φ_{ij} – фазы волн.

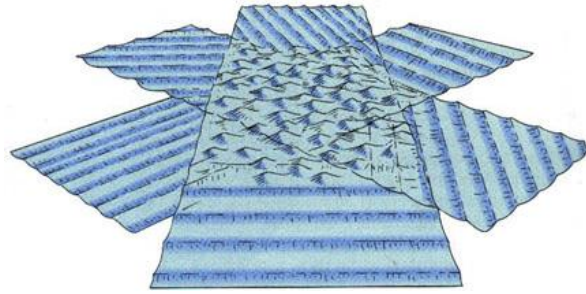


Рис. 1. Представление трехмерного волнения

График двумерной спектральной плотности трехмерного волнения строится в географических координатах по направлениям (рис. 2), при этом сечение с наибольшей дисперсией определяет генеральное направление распространения волн.

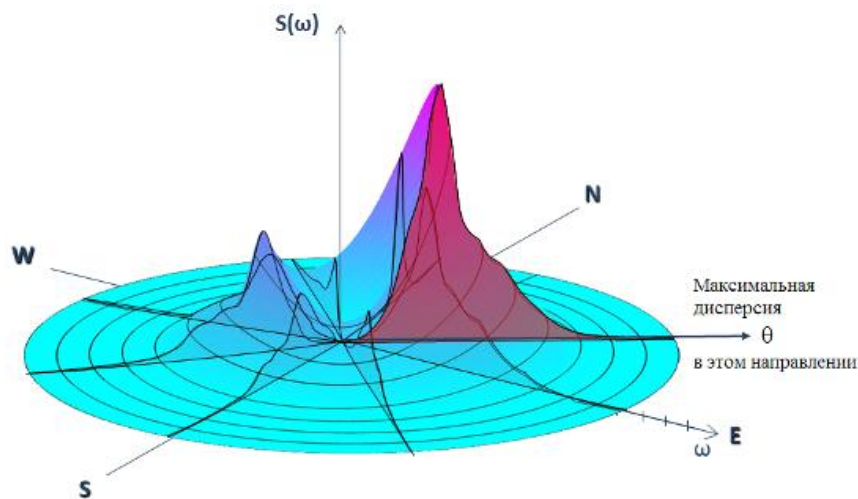


Рис. 2. Двухмерный спектр трехмерного волнения

Методы получения двумерного энергетического спектра морской поверхности разработаны в трудах А.А. Свешникова [1] и М. Лонге-Хиггинса [2]. В этих работах показано, что если в фиксированной точке поверхности моря произведена одновременная запись возвышения уровня $\zeta(t)$ волновой поверхности и двух ее уклонов $\partial\zeta(t)/\partial x$ и $\partial\zeta(t)/\partial y$ в ортогональных координатах x и y , сохраняющих неизменную пространственную ориентацию, то можно получить приближенный вид двумерного спектра в этой точке. Достигается это путем представления двумерного спектра $S(\omega, \theta)$ взволнованной поверхности в виде ряда Фурье по географическим направлениям θ .

$$S(\omega, \theta) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta),$$

где коэффициенты ряда Фурье a_n и b_n определяются из выражений:

$$a_n(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) \cos n\theta d\theta,$$

$$b_n(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) \sin n\theta d\theta.$$

В своих работах А.А. Свешников и М. Лонге-Хиггинс ограничивались первыми пятью членами разложения ряда a_0, a_1, a_2, b_1, b_2 , которые вычисляются через автокорреляционные

и взаимные корреляционные функции процессов волнения – ординаты волн и двух углов волнового склона во взаимно перпендикулярных направлениях. Коэффициенты a_0 , a_2 и b_2 являются четными функциями от частоты ω и всегда принимают положительные или нулевые значения, а коэффициенты a_1 и b_1 – нечетными и могут принимать отрицательные значения [3]. Это приводит к появлению отрицательных областей спектра, которые показаны на рис. 3:

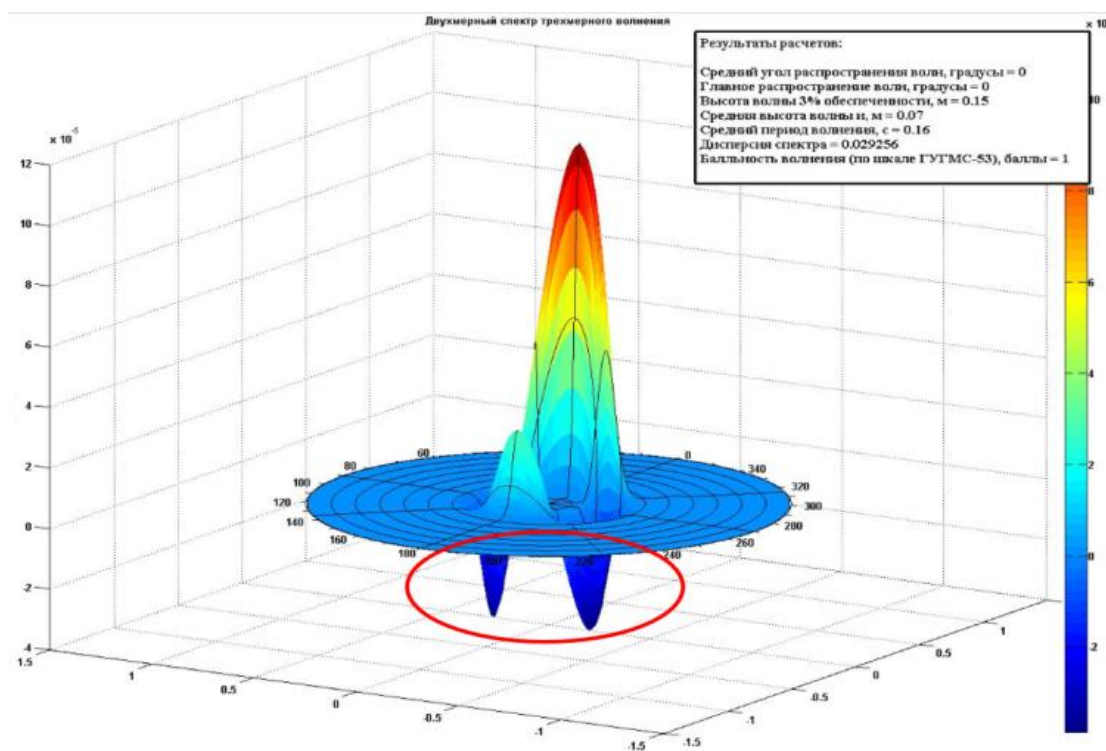


Рис. 3. Отрицательные области двумерного спектра трехмерного волнения, построенного по информации только об ординатах возвышений и углах волнового склона

Это противоречит физике процесса, однако абсолютно закономерно с точки зрения математики. Об этом писал и сам М. Лонге-Хиггинс, он предложил использовать весовые коэффициенты при членах ряда, которые способствуют сведению к минимуму появления отрицательных областей.

Теоретически ряд Фурье представляет собой бесконечное число слагаемых. М. Лонге-Хиггинс и А.А. Свешников говорили о том, что на практике можно определять до девяти членов ряда по измерениям параметров взволнованной поверхности. Теоретическая основа определения дополнительных четырех коэффициентов ряда была сделана Д.Е. Кортрайтом [7], показавшим, что их определение связано с измерением кривизны взволнованной поверхности в двух перпендикулярных направлениях, которая является второй пространственной производной ординат волн.

Для измерения этого параметра им был предложен волномерный буй, конструкция которого представляла не один буй, например, как буй М. Лонге-Хиггинса (рис. 4а), а три поплавка, шарнирно прикрепленных к единой раме (рис. 4б). При этом измерялись как угловые положения всей рамы, так и отдельных поплавков.

Схема построения прибора, предложенная Кортрайтом, оказалась громоздкой, дорогостоящей и ненадежной в условиях работы на развитом волнении и не получила распространения. Получение информации о дальнейших членах ряда, зависящих от пространственных производных второго порядка, учет которых мог бы исправить картину, с помощью простых волномерных буюв представляется затруднительным. Поэтому в мировой практике стали применять такие методы представления спектральной плотности,

как метод максимальной энтропии, максимального правдоподобия, метод Лонг – Хессельмана, метод Бейсиана и другие. Изначально они были разработаны для определения различных функций распределения, однако с учетом некоторых изменений были адаптированы и для определения спектра волнения по измерениям волномерного буя, регистрирующего ординаты возвышений и углы волнового склона. Применение этих методов стало возможным в связи с тем, что спектральную плотность трехмерного волнения стали представлять как произведение плоского спектра волн и функции углового распределения:

$$S(\omega, \theta) = S_{\zeta}(\omega) D(\omega, \theta),$$

где $D(\omega, \theta)$ – функция углового распределения, которая является неотрицательной интегрируемой функцией с полным интегралом, равным единице.

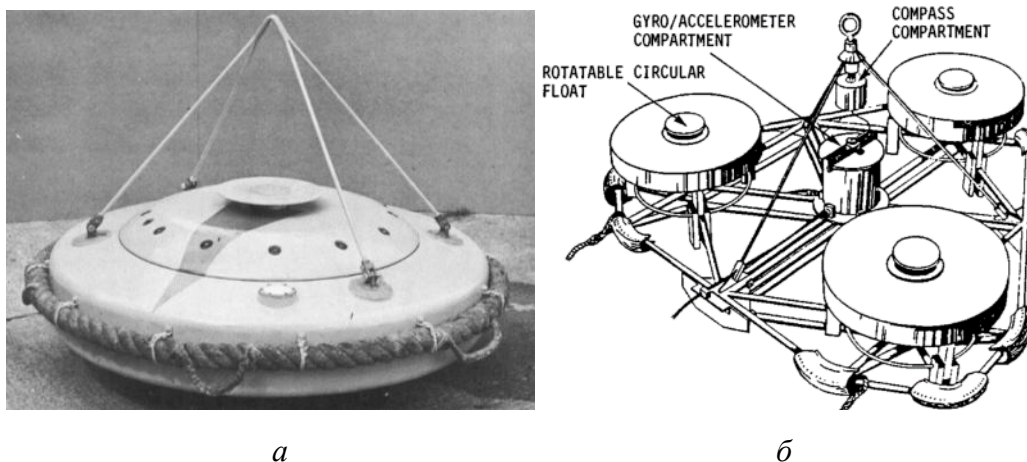


Рис. 4. Волномерные буи для измерения трехмерного волнения:
а – буй М. Лонге-Хиггинса; б – буй Д.Е. Кортрайта

Метод максимальной энтропии предполагает оценку функции углового распределения по функции энтропии, которая зависит от взаимных спектральных плотностей измеряемых процессов волнения. Данный метод устраняет отрицательные области спектров и делает спектр более узким в угловом распределении, в областях максимумов, что не всегда позволяет определить параметры волн, бегущих в других направлениях, отличных от генерального. Помимо этого, недостатком этого метода является и то, что иногда в спектре, имеющем очевидное единое генеральное направление распространения волн, появляется второй, ложный пик по направлению.

Метод максимального правдоподобия основан на предположении, что функцию углового распределения можно представить в виде линейной комбинации взаимных спектральных плотностей с учетом максимального значения функции правдоподобия. Недостатком этого метода является то, что в некоторых случаях он дает существенную ошибку в нахождении функции углового распределения в сравнении с априорно известной. Для устранения этого недостатка было предложено применять серию итераций с определенными параметрами сравнения для того, чтобы откорректировать расчетную оценку.

Метод Лонг – Хессельмана предполагает серию итерационных приближений полученной расчетной оценки функции углового распределения таким образом, чтобы она соответствовала исходным условиям равенства единице интеграла функции и неотрицательности всех ее значений.

Метод Бейсиана основан на предположении, что функция углового распределения состоит из равноразмерных отрезков-функций, количеством K на отрезке от 0 до 2π . Обычно их число находится в диапазоне от 40 до 90, что, с одной стороны, приводит к повышению разрешающей способности, но, с другой, к не всегда оправданному усложнению алгоритма вычислений.

Существуют исследования, в которых проводилось сравнение указанных методов с классическим подходом М. Лонге-Хиггинса [5]. Авторы указывают на наличие отрицательных областей в спектрах, построенных с использованием классического метода М. Лонге-Хиггинса и А.А. Свешникова. Они также отмечают наличие двойных пиков в спектрах, полученных по методу максимальной энтропии и несоответствие функции углового распределения, полученной по методу максимального правдоподобия и априорно известной функции. Некоторые особенности разных методов показаны на рис. 5, где представлено сравнение теоретической функций углового распределения с ее расчетными значениями, полученными по разным методам.

Большинство авторов, которые проводили аналогичные исследования, в своих заключениях отмечают, что наиболее соответствующий действительности результат дает метод максимальной энтропии. Но при этом он обладает описанными выше недостатками, и это необходимо учитывать при обработке результатов.

Подводя итоги проделанной работы, можно утверждать, что применение дополнительных методов определения функции углового распределения не позволяет вычислить двухмерный спектр волнения с известной точностью, а лишь получить его оценку. Очевидно, что это связано с недостатком измерительной информации, необходимой для гармонизации физических представлений о волнении с его математическим описанием. Определение значений членов ряда Фурье более пятого, которые могли бы увеличить точность оценки параметров пространственного спектра, связано с привлечением дополнительной информации, помимо ординат возвышений и углов волнового склона. Попытки ее получения с помощью технических средств известны, но в данный момент не применяются. Задача может быть решена путем возмещения недостатка информации о вторых пространственных производных ординат волн с помощью привлечения дополнительных ее источников, помимо тех, которые решают задачу ориентации на борту бота или новых методов ее обработки.

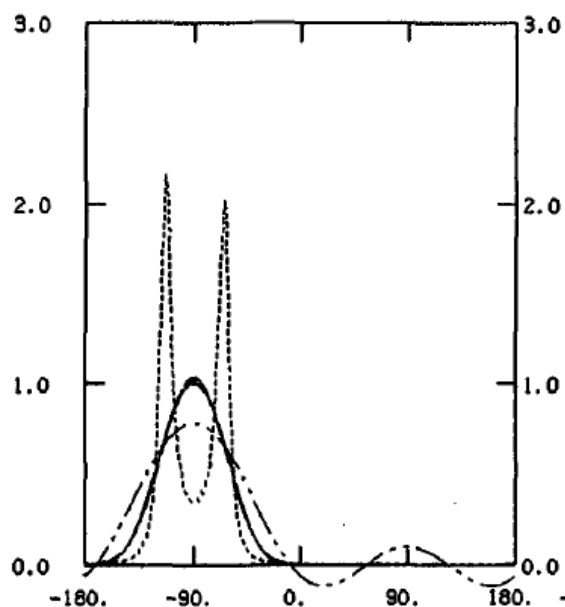


Рис. 5. Сравнение функций углового распределения, полученных разными способами: сплошной линией изображена априорно известная функция углового распределения, штрихпунктирной – полученная по методу Лонге-Хиггинса, пунктирной – по методу максимальной энтропии

Публикации

1. Грязин Д.Г. Волномерный буй «Шторм» с инерциальным микромеханическим измерительным модулем. Результаты разработки и испытаний / Грязин Д.Г., Старосельцев Л.П., Белова О.О., Глеб К.А. // *Океанология*, 2017, том 57, № 4, с. 667–674.
2. Грязин Д.Г. Исследование характеристик волномерных буйев путем сравнительных измерений / Грязин Д.Г., Белова О.О., Глеб К.А., Ковчин М.И. // *Океанология*, 2018, том 58, № 5, с. 809–816.

Литература

1. *Свеиников А.А.* Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968.
2. *Longuet-Higgins M.S., Cartwright D.E., Smith N.D.* Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of floating buoy. // *Prentice – Hall Ocean wave spectra*, 1963, p. 111–136.
3. *Michel K. Ochi.* Ocean Waves the Stochastic Approach, Cambridge ocean technology, series 6, 1998.
4. *Cartwright, D. E.* Buoy techniques for obtaining directional wave spectra / Cartwright, D. E., N. D. Smith // *Buoy Technology*, Washington, D.C., Marine Tech. Soc. 1964. p. 112–121.
5. *Benoit M., Frigaard P., Schäffer A.* Analysing multidirectional wave spectra: alternative classification of available methods, In: Proc. 27th IAHR Congress, Seminar on multidirectional waves and their interaction with structures, San Francisco, USA, 1997, p. 131–158.



Екименкова Алиса Сергеевна
Факультет прикладной оптики
E-mail: aliceeek196@gmail.com

РАЗРАБОТКА МИКРООБЪЕКТИВОВ С ПОЛИМЕРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

А.С. Екименкова

Научный руководитель – доцент А.О. Вознесенская

Полимерные материалы, обладающие оптическими свойствами, широко внедряются в разработку новых и сложных оптических устройств. Для достижения высокой производительности оптических систем возможна комбинация компонентов из традиционных минеральных линз и полимерных материалов. Такие гибридные системы обладают малыми aberrациями и улучшают качество изображения, а также имеют небольшой вес и габариты.

Цель проекта заключается в разработке принципиально нового класса оптических приборов – гибридных объективов микроскопов с линзами из полимерных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– изучить рынок оптических полимеров, определить подходящие по своим химико-физическим свойствам материалы;

- разработать методику совместной композиции полимерных и стеклянных линз;
- рассчитать и проанализировать характеристики оптической системы с помощью пакета программ *Zemax*.

Использование полимеров как заменителей традиционных оптических материалов непрерывно расширяется. Важной причиной, заставляющей двигаться в этом направлении, является трудоемкость обработки стеклянных элементов, особенно асферических, их сборки и юстировки. Органические полимерные материалы отличаются термопластичностью – способностью при нагревании переходить в вязкотекучее состояние, а при охлаждении сохранять приданную им форму [1]. Поэтому применение светопрозрачных термопластических полимеров для изготовления оптических деталей позволяет использовать высокопроизводительные методы, в частности литье под давлением, что является одним из перспективных направлений интенсификации оптического производства. Экономическая эффективность использования полимеров в качестве оптических сред основана на уменьшении затрат на материалы и их переработку. Из полимерных материалов можно в массовом масштабе изготавливать оптические детали со сложным профилем поверхности и монтажными выступами, которые трудно или почти невозможно изготовить из стекла [2].

Прозрачные полимерные материалы широко используются в оптической промышленности, оптоэлектронике, светотехнике, а также находят применение в качестве прозрачных конструкционных материалов в автомобиле- и авиационной промышленности, в сфере упаковки, изготовления предметов бытового назначения и других областях.

При проектировании системы-гибрида свойства стекла и полиматериалов дополняют друг друга. Стеклянный компонент, обращенный к внешней среде, защищает внутренний полимерный компонент гибрида, в то время как последний предоставляет большую числовую апертуру, широкие углы поля и ограниченное по дифракции изображение с высокой разрешающей способностью.

Для использования в линзовой и растровой оптике необходим ассортимент полимеров с различными показателями преломления и дисперсией, например, такие как ПММА и ПС, которые по своим оптическим постоянным приближаются соответственно к крону и флинту [3]. В настоящее время дисперсионные характеристики технологичных и коммерчески доступных оптических полиматериалов аналогичны характеристикам лишь немногих марок обычных флинтов и кронов. Поэтому требуемая для формирования высококачественного цветного изображения коррекция хроматизма оказывается недостижимой.

Устранение хроматизма первого порядка в рамках ограниченного выбора оптических полимерных материалов может быть осуществлено с помощью дифракционных линз [4–7], которые представляют собой решетки с переменным периодом, обуславливающим их хроматические аберрации (рис. 1). При использовании дифракционных свойств оптической поверхности становится возможным спроектировать гибридный элемент для получения ахроматического скорректированного элемента за счет того, что дифракционная поверхность вносит дополнительные параметры (коэффициенты бинарной поверхности типа 2) в оптическую схему. Сферическая аберрация для точки на оси, как правило, является одной из самых важных первичных аберраций, поскольку без ее удовлетворительной коррекции не удастся получить хорошее качество изображения и по всему полю объектива. Альтернативный метод уменьшения сферической аберрации также связан с использованием дифракционных оптических элементов [8].

Коррекция хроматизма более высоких порядков, характерного для оптических систем, включающих дифракционные элементы, может успешно осуществляться за счет асферизации полимерных линз, стоимость которой на несколько порядков ниже стоимости асферизации линз, выполненных из минерального стекла [9]. Современные методы формообразования на основе прецизионной штамповки позволяют с требуемой оптической точностью относительно просто формировать поверхности полимерных линз практически

любой формы, тиражировать линзы с асферическими преломляющими поверхностями, а также изготавливать эти поверхности с дифракционным микрорельефом.

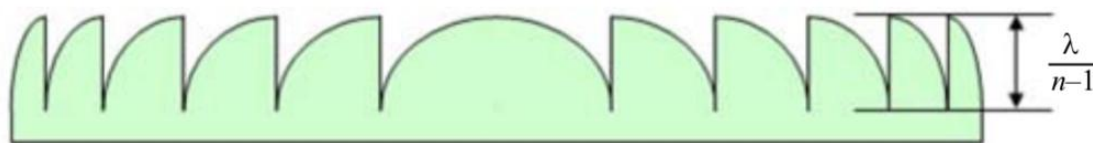


Рис. 1. Дифракционная поверхность

Исследования показали, что для устранения хроматизма при произвольном положении предмета необходима апохроматизация с дополнительными дифракционными линзами, включенными в оптическую схему микрообъектива. Данная схема должна удовлетворять нескольким условиям: наряду с положительными линзами из ПММА в нее должна входить по меньшей мере одна отрицательная линза из ПК. А также конфигурация оптической системы должна обеспечивать необходимое фокусное расстояние в пределах выбранного спектрального диапазона (до включения дифракционной линзы). К этим требованиям необходимо добавить ограничение комы и астигматизма.

Все вышеупомянутые условия могут выполняться простым триплетом. В частности, это обусловлено возможностью использования асферических преломляющих поверхностей, а также тем фактом, что для начальной конфигурации не требуется коррекция сферической аберрации, поскольку в системе будет задействована дифракционная линза. Однако остаточный сферохроматизм ахромата на основе триплета заметно ограничивает разрешение микрообъектива из-за расширенного спектрального диапазона и требует использования схемы с четырьмя рефракционными линзами, у каждой из которых две асферические поверхности.

После размещения дифракционной линзы на передней поверхности второго элемента и дальнейшей оптимизации были получены окончательные конфигурационные и расчетные значения пятилинзового апохроматического микрообъектива. Основными преимуществами пятилинзового апохромата являются низкий уровень монохроматических аберраций, строгая апохроматизация с небольшим третичным спектром и то, что искажение изображения составляет всего 1%. На рис. 2 изображена оптическая схема микрообъектива. На рис. 3 представлены кривые продольного хроматизма микрообъектива, из которых видно, что применение дифракционного элемента обеспечило снижение продольной хроматической аберрации.

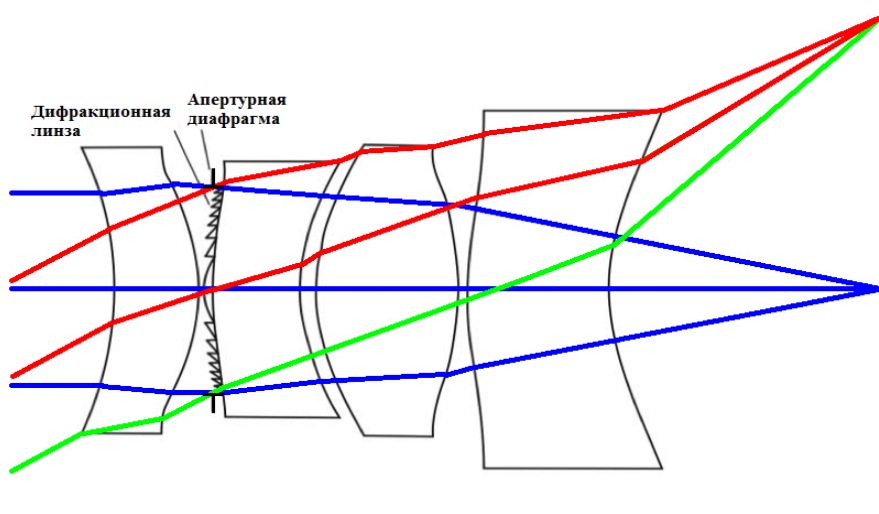


Рис. 2. Схема пятилинзового гибридного микрообъектива

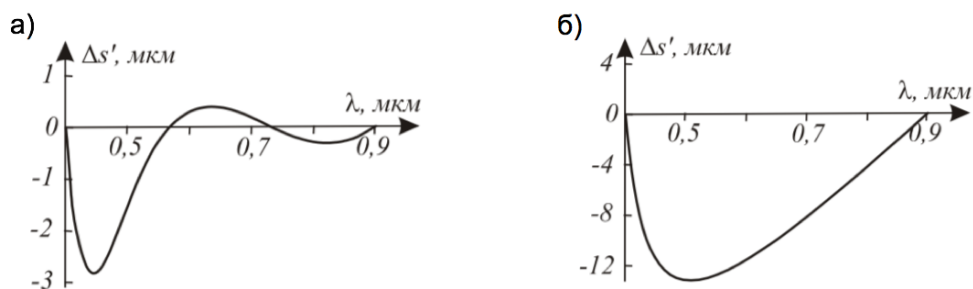


Рис. 3. Кривые продольного хроматизма: а – с применением дифракционной линзы; б – с отсутствием дифракционной линзы

Основные результаты

- Изучен рынок оптических полимеров, определены подходящие по своим химико-физическим свойствам материалы;
- предложена композиция оптической системы микрообъектива;
- выполнены расчет оптической системы и оценка качества.

Публикации

1. Екименкова А.С., Вознесенская А.О. Расчет микрообъективов с полимерными элементами [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/7575/7575.pdf> (дата обращения: 15.10.18).
2. Ekimenkova A.S., Voznesenskaya A.O. Modeling of hybrid polymer optical systems // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10690. P. 1069014.

Литература

1. Освальд Т.А. и др. Литье пластмасс под давлением: пер. с англ. / под ред. Э.Л. Калинин. СПб., 2006. – 712 с.
2. Торбин И.Д., Даминов Ю.Ф. Применение прозрачных термопластов в оптической промышленности // Пластмассы. 1977. № 3. С. 61–63.
3. Золоторев В.М. и др. Оптические постоянные промышленных полимеров в ИК-области // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 101. № 5. С. 763–770.
4. Stone T., George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats // Applied Optics. 1988. Vol. 27. No 14. P. 2960–2971.
5. Gan M.A. Optical systems with holographic and kinoform elements // Proceedings of SPIE. 1989. Vol. 1136. P. 115.
6. Rouke J.L. et al. Design of three-element night-vision goggle objectives // Applied Optics. 1998. Vol. 37. No 4. P. 622–626.
7. Hua H. et al. Design of an ultralight and compact projection lens // Applied Optics. 2003. Vol. 42. No 1. P. 97–107.
8. Garcia-Lievanos O. et al. Spherical aberration correction using refractive-diffractive lenses with an analytic-numerical method // Advances in Optical Technologies. 2010. Vol. 2010. P. 783206.
9. Schaub M.P. The design of plastic optical systems. Bellingham, 2009. – 230 p.



Жукова Мария Олеговна
Факультет фотоники и оптоинформатики
E-mail: mozhukova@corp.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРКАЛИРОВАННОГО ХЛОРИДОМ ЖЕЛЕЗА (III) МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА В ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ С РАЗРЕШЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

М.О. Жукова

Научный руководитель – профессор **В.Г. Беспалов**

Нехватка эффективных устройств для генерации, детектирования и управления излучением терагерцового диапазона частот в системах терагерцовой спектроскопии сильно ограничивает возможные области их применения. В работе исследованы оптические свойства интеркалированных хлоридом железа слоистых структур графена на различных подложках в инфракрасном и терагерцовом диапазонах. Определение свойств новых компактных материалов является важным результатом, поскольку они могут быть использованы для оптико-терагерцового преобразования.

Цель проекта – исследование оптических свойств модификаций малослойного графена на различных подложках в терагерцовом диапазоне частот электромагнитного излучения для описания возможности применения таких материалов в устройствах для генерации, детектирования и управления излучения терагерцового и ближнего инфракрасного диапазонов частот в системах терагерцовой спектроскопии.

Задачи:

- получить уникальные образцы слоев модифицированного хлоридом железа графена на различных подложках: стекло, сапфир и пленки полиимида;
- провести экспериментальное исследование полученных образцов в оптическом и ближнем ИК-диапазоне для выявления линейных и нелинейных оптических свойств;
- провести экспериментальное исследование пропускания образцов модифицированного графена на различных подложках в ТГц-диапазоне на установке терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени;
- определить оптимальные параметры полученных структур;
- экспериментально исследовать многослойные структуры на основе слоев графена и полупроводниковых кристаллических структур в качестве основы для фильтров и модуляторов в ТГц-диапазоне для управления света светом.

Терагерцовая область электромагнитного спектра, лежащая в частотном диапазоне от 100 ГГц до 10 ТГц, располагается на шкале частот между микроволновым и инфракрасным диапазоном. ТГц-излучение обеспечивает широкие возможности для изучения молекулярной структуры веществ и освоения новых диапазонов обработки и передачи данных. Можно выделить следующие основные сферы применения ТГц-технологий: контроль и диагностика биологических материалов, медицинские исследования, контроль окружающей среды, химический и биологический анализ веществ, обеспечение связи в интегральных схемах, контроль безопасности, качества продукции и дефектоскопия, создание ТГц-радаров и оптическая ТГц-томография с разрешением во времени, ТГц-изображения предметов.

Одно из наиболее распространенных устройств, работающих с ТГц-спектром частот, – терагерцовые спектрометры с разрешением во времени. Принцип работы систем ТГц-спектроскопии с разрешением во времени (ТГц-СРВ) основан на когерентном детектировании ТГц-импульсов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Эта техника позволяет независимо друг от друга измерять фазу и амплитуду ТГц-поля и после Фурье-преобразования получать частотные спектры. Характеристики исследуемого вещества определяются с помощью анализа и сравнения временной формы электрического поля и спектра ТГц-импульса, который прошел испытываемый образец, и временной формы и спектра исходного, неизмененного импульса.

В современных системах терагерцовой спектроскопии, основанных на лазерах ближнего инфракрасного диапазона с фемтосекундной длительностью импульса, все чаще возникает проблема нехватки эффективных и компактных материалов [1] для создания модулей генерации, детектирования, а также преобразования терагерцового излучения. На сегодняшний день материалы, используемые в системах терагерцовой спектроскопии, основанных на фемтосекундных источниках излучения, можно разделить на следующие группы: полупроводниковые и нелинейные кристаллы, органические кристаллы, метаматериалы и композиты. Все они применяются в оптико-терагерцовых преобразованиях и имеют ряд достоинств и недостатков: органические кристаллы со временем теряют свои свойства; композитные материалы, например антенны из различных металлов на подложках, обладают меньшим динамическим диапазоном по сравнению с полупроводниковыми кристаллами; метаматериалы обладают малым коэффициентом преобразования и сложностью в производстве; полупроводниковые и нелинейные кристаллы дают достаточно высокий коэффициент преобразования, но не имеют возможности управлять светом при помощи света.

В последние годы все больше научных групп проводят работы по исследованию перспективных двумерных материалов, а именно графена [2], который представляет собой двумерный слой атомов углерода и благодаря своим уникальным свойствам находит применение в различных областях науки и техники, в том числе в электронике: в транзисторах, устройствах логики. В оптическом диапазоне у графена наблюдаются сильные нелинейные эффекты, поэтому он, например, используется в качестве насыщающихся поглотителей для импульсных лазеров и широкополосных детекторов.

В связи с растущим интересом к терагерцовому диапазону частот началось активное исследование графена и его модификаций именно в данном диапазоне. Проводят исследования как самого материала на различных подложках, так и его многослойных структур. Уже существует ряд работ и патентов, показывающих возможность использования графена как эффективного источника, детектора, модулятора, фильтра в ТГц-диапазоне частот. Большой объем работ посвящен исследованию линейных и нелинейных свойств графена в видимой и ближней инфракрасной области, возможностям использования его для генерации второй и высших гармоник. В концепции данного проекта, в связи тем, что для получения и регистрации ТГц-излучения требуются фемтосекундные лазеры ближнего инфракрасного диапазона, необходимо учитывать взаимодействие такого излучения с графеном для анализа нелинейных конкурирующих процессов, которые могут влиять на эффективность преобразования.

В данном проекте исследуется новый материал, уникальный модифицированный графен – интескарированный FeCl_3 на различных подложках (5–6 атомных слоев), который ранее в рамках вышеописанных задач не использовался. Интескарирование – это обратимое включение молекулы или их группы между другими молекулами или группами, некий аналог легирования для тонких пленок. Данный материал был впервые разработан научной группой Университета Эксетер [3] для применения в электронике и устройствах визуализации. Его отличительными особенностями являются улучшенные оптические и нелинейные свойства, лучшая химическая и температурная стойкость, а также гибкость по

сравнению с стандартным малослойным графеном. Изменение зонной структуры должно повлиять и на работу в ТГц-диапазоне частот.

В данной работе проводилось сравнение оптических свойств модифицированных слоев графена на трех различных подложках: стекло, сапфир и полиимид (последние обладают хорошим пропусканием в ТГц диапазоне частот) с чистым однослойным, малослойным (5–6 слоев) и многослойным (50–60 слоев) графеном на таких же подложках.

В работе используется метод терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени, позволяющий исследовать спектральный состав большого количества веществ, а также стандартные методы спектроскопии в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

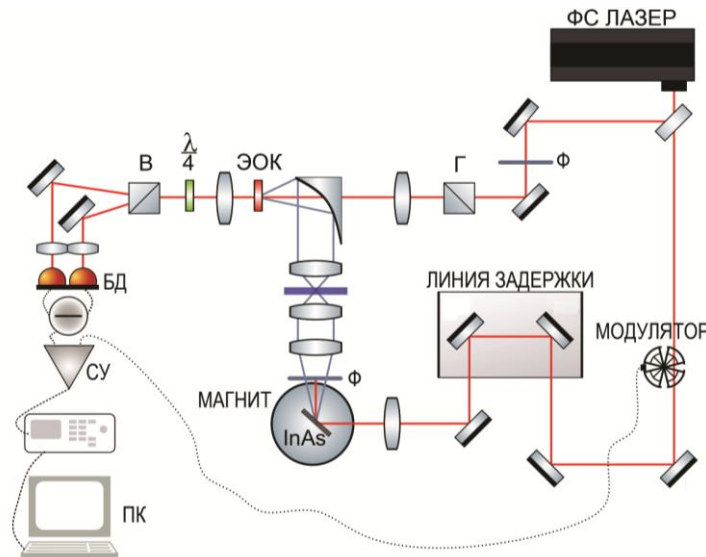


Рис. 1. Схема экспериментальной установки терагерцового спектрометра с разрешением во времени: Φ – фильтры; БД – балансный фотодетектор; Г – призма Глана; В – призма Волластона; СУ – синхронный усилитель; ЭОК – электрооптический кристалл

Исследование оптических свойств образцов было проведено при помощи спектрофотометра исследовательского класса *Evolution-300*. На этапе обработки полученных данных численные расчеты реализованы в специально разработанном программном обеспечении в программной среде *LabVIEW National Instruments*. Для обработки больших массивов данных использовался суперкомпьютер кафедры фотоники и оптоинформатики. Построение полученных в результате численных расчетов графических зависимостей проводилось в пакете для анализа данных *OriginPro 8.1*.

Произведено сравнение пропускания нелегированных и интеркалированных хлоридом железа (III) слоистых структур графена на различных подложках (стекло, сапфир, полиимид) в видимом и инфракрасном диапазонах (это является важным результатом, поскольку лазерные источники этих диапазонов используются для оптико-терагерцового преобразования). Результаты представлены на рис. 2.

Как видно из представленных зависимостей, интеркаляция делает малослойный графен более прозрачным в диапазоне длин волн от 800 нм. Важно отметить, что именно лазерное изучение в ближнем ИК-диапазоне используется для оптико-терагерцового преобразования, и полученные результаты крайне важны для создания устройств в будущем.

В следующей части работы проведено сравнение пропускания нелегированных и интеркалированных хлоридом железа (III) слоистых структур графена на различных подложках (стекло, сапфир, полиимид) в широком терагерцовом диапазоне на установке терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени (схема установки была представлена на рис. 1).

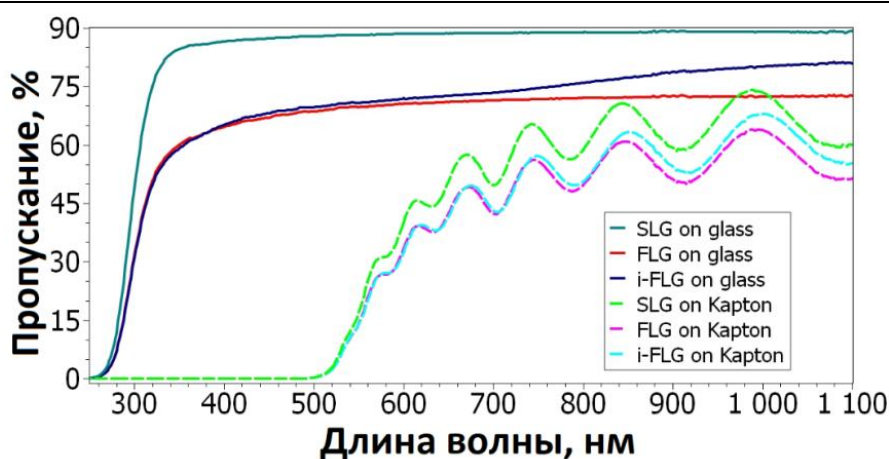


Рис. 2. Спектр пропускания образцов модифицированного графена в видимом диапазоне на различных подложках (SLG on glass – однослойный графен на стекле, FLG on glass – малослойный графен (5–6 слоев) на стекле, i-FLG on glass – интеркалированный малослойный графен (5–6 слоев) на стекле, SLG on Kapton – однослойный графен на полиимиде, FLG on Kapton – малослойный графен (5–6 слоев) на полиимиде, i-FLG on Kapton – интеркалированный малослойный графен (5–6 слоев) на полиимиде)

На рис. 3 представлено пропускание образцов модифицированного графена на различных подложках в ТГц-диапазоне частот от 0,1 до 2 ТГц относительно подложки. Мы видим влияние подложки, так как в противном случае относительное пропускание было бы одинаково для всех представленных образцов.

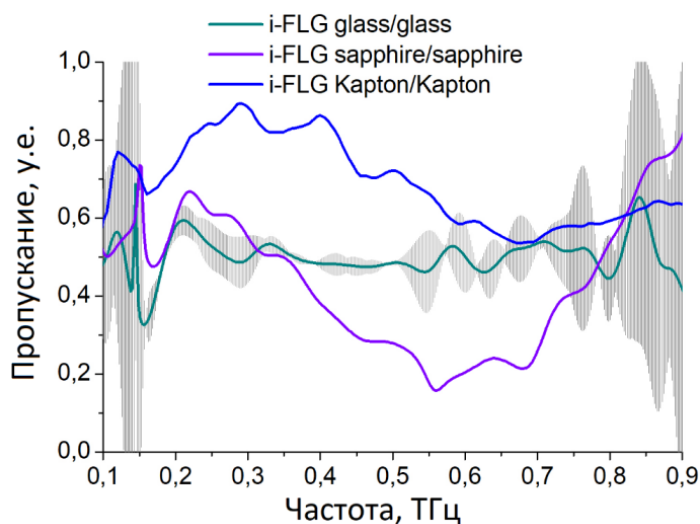


Рис. 3. Спектр пропускания образцов интеркалированного хлоридом железа малослойного графена в терагерцовом диапазоне частот (i-FLG glass/ glass – интеркалированный малослойный графен (5–6 слоев) на подложке из стекла относительно стекла, i-FLG sapphire/ sapphire – интеркалированный малослойный графен (5–6 слоев) на сапфире относительно сапфира, i-FLG Kapton/ Kapton – интеркалированный малослойный графен (5–6 слоев) на полиимиде относительно полиимида)

Полученные результаты позволят в последующих экспериментах определить оптимальные параметры подложки для использования таких образцов в качестве модуляторов и фильтров ТГц-диапазона. В дальнейшем планируется определить оптимальные параметры полученных структур для применения в устройствах генерации, детектирования и преобразования излучения.

В настоящее время существует проблема нехватки эффективных и компактных устройств для генерации, детектирования и управления излучения терагерцового и ближнего

инфракрасного диапазонов частот в системах терагерцовой спектроскопии, что сильно ограничивает возможные области их применения. Исследование носит поисковый характер. Его результаты позволят разработать новые технологии и прототипы устройств для работы с широкополосным терагерцовым излучением. Успешная реализация данного проекта откроет широкие перспективы для внедрения в современную индустрию ТГц-приборов, а развитие терагерцовой спектроскопии в свою очередь может внести весомый вклад в продвижение наукоемких технологий Санкт-Петербурга.

В результате проделанной работы:

- проведен обзор литературы по вопросам эффективности генерации терагерцового излучения и применению графена и структур на его основе;
- проведено сравнение пропускания нелегированных и интеркалированных хлоридом железа (III) слоистых структур графена на различных подложках (стекло, сапфир, полиимид) в видимом и инфракрасном диапазонах (это является важным результатом, поскольку лазерные источники этих диапазонов используются для оптико-терагерцового преобразования).

Публикации

Zhukova M.O. et al. Transmission of modified graphene layers on glass, sapphire and polyimide film substrates in UV, visible, NIR and THz spectral ranges // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). Saint Petersburg, 2018. P. 395.

Литература

1. *Zhang X.C. et al.* Extreme terahertz science // *Nature Photonics*. 2017. Vol. 11. No 1. P. 16.
2. *Mas-Balleste R. et al.* 2D materials: to graphene and beyond // *Nanoscale*. 2011. Vol. 3. No 1. P. 20–30.
3. *Khrapach I. et al.* Novel highly conductive and transparent graphene-based conductors // *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. No 21. P. 2844–2849.



Калинкина Мария Евгеньевна
Факультет безопасности информационных технологий
E-mail: mariia_kalinkina@mail.ru

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДИК ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М.Е. Калинкина

Научный руководитель – профессор В.Л. Ткалич

Проект посвящен разработке и внедрению новых технологических методик обеспечения стабильности выходных параметров интегральных датчиков и микроэлектромеханических систем (МЭМС), используемых для устройств контроля,

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

измерений, диагностики и управления объектами техники. Новые технологические методики должны обеспечивать стабильность выходных характеристик. Они будут конкурентоспособны и предназначаются для создания инерциальных систем на основе микромеханических приборов, которые позволят минимизировать размеры, энергопотребление и себестоимость систем, что даст возможность реализовать методы инерциальной навигации на новом уровне.

Задачи:

- разработать и внедрить новые технологические методики обеспечения стабильности выходных параметров микромеханических приборов (ММП), используемых для систем контроля, измерений, диагностики и управления объектами техники;
- разработать базовые технологические процессы производства, обеспечивающие стабильность выходных параметров чувствительного элемента (ЧЭ) МЭМС;
- разработать рекомендации для проектирования новых интегральных датчиков и ММП по результатам исследования стабильности параметров их ЧЭ;
- изготовить макетные образцы изделий и провести их испытания.

В последнее десятилетие ведутся активные разработки и исследования ММП. Ускоренное развитие породило микроэлектромеханические датчики различных физических размеров, в частности в связи с растущими потребностями отрасли для точных измерений. Микроэлектронная технология произвела революцию в создании инструментов обработки информации и позволяет наладить массовое производство и приобретение информационных датчиков. Технический прогресс в области инерциальной навигации в значительной мере достигнут благодаря существенному улучшению технических характеристик ММП и увеличению разнообразия предлагаемых технических решений. Процесс эксплуатации ММП связан со сложными внешними воздействиями, в ходе которых могут возникать ошибки в выходных сигналах измерительных приборов.

Актуальность проекта обусловлена необходимостью снижения массо-габаритных характеристик, повышения надежности, увеличения ресурса эксплуатации, снижении стоимости производства МЭМС.

Основой для разработки конкурентоспособной элементной базы интегральных датчиков первичной информации является внедрение новых высокоэффективных методов изготовления и контроля качества их ЧЭ.

ЧЭ, основанные на структурах «кремний на сапфире», имеют большие преимущества с точки зрения их стабильности и точности при использовании в неблагоприятных условиях эксплуатации (при высоких и низких температурах, излучении, ионизации и других). На базе этих ЧЭ было разработано и изготовлено несколько датчиков в России и за рубежом.

Из множества конструкций датчиков давления можно выделить тензорезистивные, пьезоэлектрические, пьезорезонансные, емкостные и оптические.

Принцип действия, используемый в тензорезистивных датчиках, широко применяется в интегральных датчиках различных механических величин из-за высокой точности и относительной простоты конструкции реализующих его устройств.

В настоящее время большинство ММП в России изготавливаются на базе ЧЭ, в основе которого лежит принцип изменения тензосопротивления. Тензорезистивный мост формируется на эпитаксиальной кремниевой пленке или на сапфировой подложке.

Внедрение технологии микроэлектроники и разработка на ее основе микромеханических датчиков первичной информации позволяет резко увеличить объем и снизить цены на выпускаемую продукцию, которая по соотношению «цена – качество» выходит на лидирующие позиции, так как используемый в качестве конструктивного материала монокристаллический кремний имеет высокую стабильность физических и механических свойств.

Все ММП характеризуются компонентами погрешности: гистерезисом, вызванным изменением температуры и давления, нелинейностью характеристики, температурным дрейфом начального смещения.

Аналитические методы расчета чаще всего используются для анализа инструментальных и методологических компонентов погрешностей, а также тех погрешностей, которые связаны с несоблюдением условий измерения и эксплуатации, оговоренных в техническом задании.

Освоение группового производства, которое было создано с применением технологии микросхем, стало важным шагом в разработке микроприборов.

В результате проделанной работы:

- осуществлена разработка алгоритмического и программного обеспечения для исследования статистических погрешностей;
- созданы модифицированные варианты конструкции ЧЭ с улучшенными метрологическими характеристиками и повышенными показателями точности;
- разработана новая методология проектирования ММП;
- разработаны новые конструктивные решения для оптимизации топологии ЧЭ, необходимые для улучшения метрологических характеристик и повышения надежности ММП;
- разработаны новые виды ЧЭ с пониженной температурной погрешностью, низкой себестоимостью и повышенными конкурентоспособными характеристиками на мировом рынке.

Публикации

1. *Kalinkina M.E. et al.* Analysis of errors in micromechanical devices // 14th Interational Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018): Proceedings. Novosibirsk. 2018. Vol. 1. No 6. P. 272–276.
2. *Калинкина М.Е. и др.* Разработка математической модели погрешностей акселерометра [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: http://old.kmu.itmo.ru/collections_article/7178/razrabotka_matematicheskoy_modeli_pogreshnoste_y_akselerometra.htm (дата обращения: 25.02.2019).
3. *Калинкина М.Е. и др.* Анализ погрешностей микромеханических гироскопов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: http://old.kmu.itmo.ru/collections_article/7192/analiz_pogreshnostey_mikromehanicheskikh_giroskopov.htm (дата обращения: 25.02.2019).
4. *Kalinkina M.E. et al.* Analysis and design of pressure sensors for micromechanical integrated pressure sensors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 450. No 1. P. 032004.
5. *Kalinkina M.E. et al.* Development of computer-aided design system of elastic sensitive elements of automatic metering devices // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 052018.
6. Пат. 181216 Российская Федерация. Интегральный микромеханический гироскоп / М.Е. Калинкина и др. Опубл. 06.07.2018.
7. *Калинкина М.Е.* Перспективные направления развития современных микромеханических акселерометров [Электронный ресурс] // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2018): труды Международной научно-технической конференции. Самара, 2018. С. 77–79. URL: https://ssau.ru/pagefiles/pit_2018_sbornik.pdf (дата обращения: 25.02.2019).
8. *Калинкина М.Е.* Синтез и применение нанокристаллов кремния // Химическая технология функциональных наноматериалов: сборник материалов международной конференции со школой и мастер-классами для молодых ученых. М., 2017. С. 108.



Камалиева Айсылу Насыховна
Факультет фотоники и оптоинформатики
E-mail: aisylu.kamaliewa@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ АНСАМБЛЕЙ СПАЗЕРОВ

А.Н. Камалиева, Н.А. Торопов

Научный руководитель – профессор Т.А. Вартамян

В ходе выполнения работы была создана гибридная структура, представляющая собой ансамбль наночастиц серебра, покрытый тонким слоем красителя кумарина. В полученной гибридной структуре наблюдались два основных признака, характерных для вынужденного излучения, а именно: сужение спектра флуоресценции и нелинейная зависимость интенсивности флуоресценции от энергии накачки (с порогом 2 мДж). В дополнение ко всему было экспериментально установлено, что в гибридной структуре флуоресцентный сигнал поляризован.

Введение

Интенсивное развитие нанонауки требует миниатюризации когерентных источников света до размеров порядка десятков нанометров, что сравнимо с размерами транзисторов или биомолекул. Однако создание нанометровых лазеров привычных нам конструкций является невозможным, так как размер резонатора в обычной лазерной системе не может быть меньше половины длины волны, которую он излучает. Одно из решений данной проблемы было опубликовано в 2003 году Бергманом и Штокманом [1]. Ученые предложили изменить механизм обратной связи и заменить привычные зеркала в резонаторе на металлические наноструктуры, которые поддерживают плазмонные колебания. Устройство назвали спазером. Спазеры, непосредственно генерируя плазмоны, преодолевают дифракционный предел. Накачка создает инверсию населенностей в усиливающей среде, возбуждаются плазмоны и при их сильном резонансе взаимодействии возникает вынужденное излучение.

Первая экспериментальная реализация спазера была предложена группой Ногинова в 2009 году. В данной работе сферическая наночастица золота диаметром 14 нм, окруженная диэлектрической оболочкой с красителем *Oregon Green*, продемонстрировала узкую полосу вынужденного излучения на длине волны 531 нм [2]. Несмотря на то, что наблюдалось вынужденное излучение, результаты данной работы вызывают критику. Так, результаты, полученные при использовании коллоидного раствора плазмонных наночастиц, окруженных красителем, могут быть интерпретированы как безрезонаторная генерация в рэндом-лазере [3].

Генерационные характеристики в спазере в некотором смысле аналогичны характеристикам в обычных лазерах. Так, условием генерации излучения является превышение порогового значения энергии накачки, что подтверждается спектральным сужением, увеличением направленности и поляризованности, а также временной когерентностью излучения. В то время как для макроскопических лазеров получение этих характеристик является прямым, для плазмонных наноструктур оно весьма затруднительно. Так, в плазмонных наноструктурах возможно усиленное спонтанное излучение

в усиливающей среде, которое может вызвать спектральное сужение и в результате быть ошибочно принято за генерацию [4]. Таким образом, наличие сужения и нелинейной зависимости не является достаточным для интерпретации результатов как спазерной генерации. Для этого необходимо исследование таких пространственных характеристик излучения, как поляризация, угловая зависимость и когерентность.

В данной работе впервые демонстрируются поляризационные свойства монослоя плазмонных наночастиц, покрытых тонким слоем красителя.

Методы исследования

В качестве материала для создания наночастиц было выбрано серебро, так как наночастицы данного металла обладают плазмонным резонансом в видимой области спектра. Островковые пленки наночастиц серебра были созданы методом термического осаждения паров металла на кварцевые подложки в вакуумной камере *Kurt Lesker* при давлении остаточных газов порядка 10^{-7} Торр. Эквивалентная толщина островковой пленки определялась кварцевым датчиком и составляла 10 нм. Форма и размер наночастиц определяют положение и ширину плазмонного поглощения. Ширина полосы плазмонного поглощения также зависит от эквивалентной толщины островковой пленки.

При близком расположении молекул флуорофоров к поверхности плазмонных наночастиц их флуоресценция может быть потушена металлом. Чтобы этот эффект минимизировать, в данной работе использовался изолирующий слой полиметилметакрилата (ПММА). Раствор ПММА в толуоле методом центрифугирования наносился на поверхность серебряных наночастиц. Оценочная толщина слоя ПММА составляла единицы нанометров.

В качестве усиливающей среды был выбран лазерный краситель кумарин 481 (С-481), так как его спектры поглощения и флуоресценции перекрываются со спектром плазмонного резонанса серебряных наночастиц. Данное условие является ключевым для реализации спазера.

Для создания гибридной структуры этанольный раствор красителя кумарина методом выпаривания наносился на поверхность серебряных наночастиц, покрытых тонким слоем ПММА. Для сравнения такое же количество раствора красителя наносилось на чистую кварцевую подложку. Эквивалентная толщина кумариновой тонкой пленки в обоих образцах была одинакова и составляла 50 ± 5 нм.

Экспериментальная схема

Для снятия генерационных характеристик был собран экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 1. Флуоресценция молекул красителя возбуждалась с помощью третьей гармоники *Nd:YAG*-лазера. Работа была выполнена при работе лазера в импульсном режиме, частота повторений 4 Гц, длительность импульса 10 нс, площадь пучка – $0,45 \text{ см}^2$. Флуоресцентный сигнал собирался с помощью приемника и через оптическое волокно подавался на многоканальный фотонный анализатор. Энергия импульса регулировалась с помощью нейтральных светофильтров и варьировалась от 0,43 мДж до 9,41 мДж.

Основные результаты работы

Снятые на экспериментальной установке спектры флуоресценции исследуемых образцов при разных энергиях накачки представлены на рис. 2. Для гибридной структуры при энергиях накачки выше 2,38 мДж появляется узкая линия излучения на широкой полосе флуоресценции. В отличие от широкой полосы флуоресценции, при увеличении энергии накачки эта узкая линия излучения продолжает интенсивно расти. В тонкой кумариновой пленке, где нет наночастиц, узкая полоса излучения отсутствует.

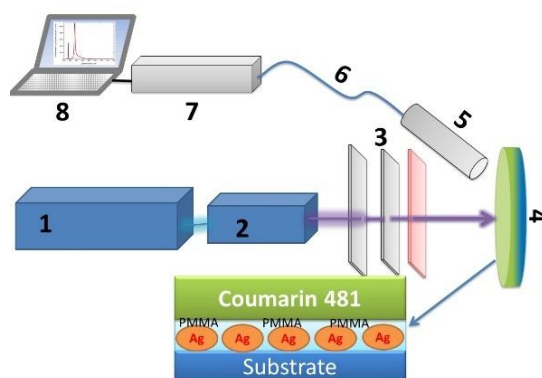


Рис. 1. Экспериментальная установка для снятия генерационных характеристик: 1 – Nd:YAG-лазер, 2 – генератор третьей гармоники, 3 – фильтры, 4 – гибридная структура, 5 – приемник, 6 – оптическое волокно, 7 – многоканальный фотонный анализатор PMA – 12 (Hamamatsu), 8 – ноутбук

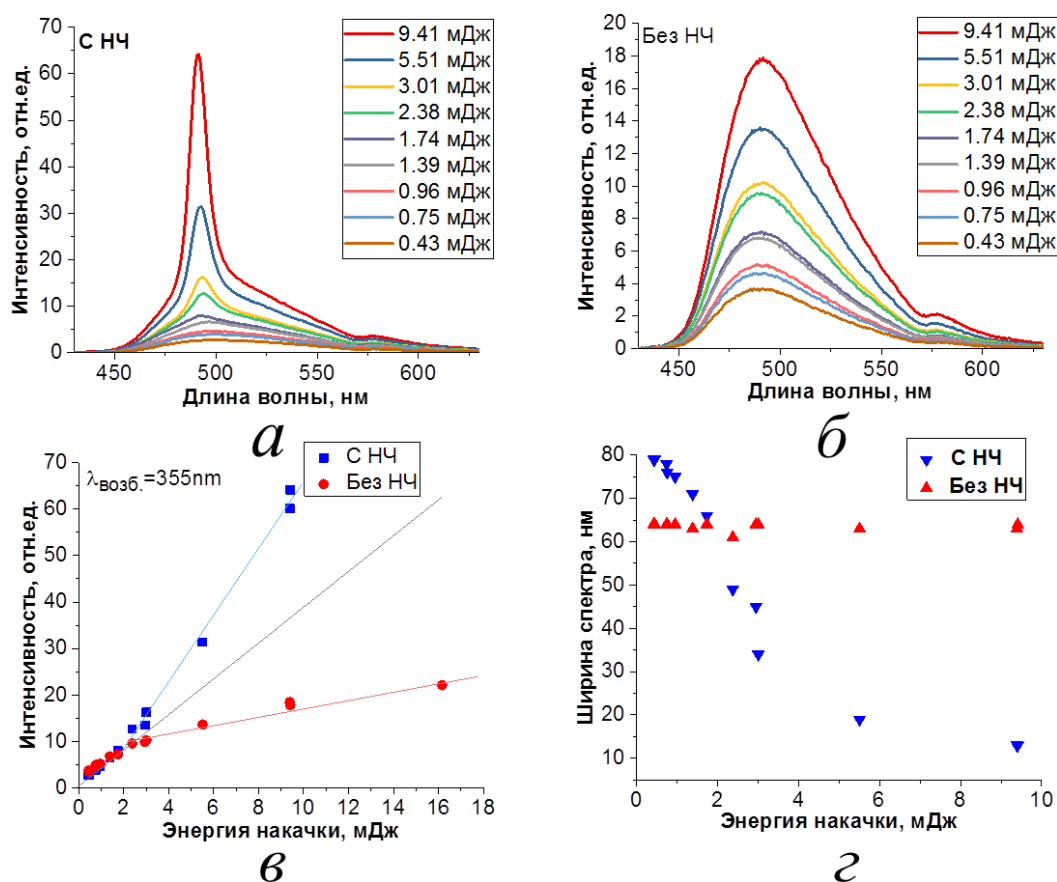


Рис. 2. Результаты экспериментов: а – спектры флуоресценции гибридной структуры при разных энергиях накачки; б – спектры флуоресценции тонкой кумариновой пленки без наночастиц при разных энергиях накачки; в – зависимость интенсивности флуоресценции от энергии накачки гибридной структуры (синяя кривая) и тонкой кумариновой пленки без наночастиц (красная кривая); г – зависимость ширины спектра флуоресценции от энергии накачки для гибридной структуры (синяя кривая) и тонкой кумариновой пленки без наночастиц (красная кривая)

Зависимости интенсивности флуоресценции от энергии накачки тонкой кумариновой пленки и гибридной структуры представлены на рис. 2в. При малых энергиях накачки до 2,38 мДж интенсивность флуоресценции тонкой пленки кумарина и гибридной структуры

растет одинаково линейно, при энергиях больше 2,38 мДж в обоих образцах она становится резко нелинейной. В случае тонкой кумариновой пленки эта зависимость сублинейна, после значения энергии накачки 2,38 мДж кривая уходит в насыщение. В случае гибридной структуры после значения 2,38 мДж кривая начинает расти быстрее, чем при меньших энергиях накачки.

Как уже было отмечено, с увеличением энергии накачки в гибридной структуре наблюдается сужение флуоресцентной полосы. Это хорошо иллюстрирует зависимость полной ширины на полувысоте от энергии накачки (рис. 2г). В тонкой кумариновой пленке ширина флуоресцентной полосы равна 65 нм, и с увеличением энергии накачки она не изменяется. В гибридной структуре, наоборот, с увеличением энергии накачки флуоресцентная полоса сужается по экспоненте, и наибольшее сужение 10 нм достигается при ее максимальном значении.

Как было продемонстрировано выше, в гибридной структуре наблюдаются два основных признака вынужденного излучения: нелинейная зависимость интенсивности флуоресценции от энергии накачки, а также сужение спектра флуоресценции при больших ее значениях. Согласно литературным данным, этих двух признаков недостаточно для точной интерпретации результатов [4].

Для доказательства того, что излучение является вынужденным, в работе исследовалась поляризационная зависимость.

Для снятия поляризационных характеристик использовался поляризатор, который прикреплялся на приемник. Флуоресцентный сигнал молекул кумарина на поверхности наночастиц снимался при двух взаимно ортогональных положениях поляризатора, соответствующих *s*- и *p*-поляризациям в плоскости рассеяния. На рис. 3а схематично представлено расположение поляризатора.

При положении поляризатора 1 (рис. 3, красная кривая), соответствующем *s*-поляризации в плоскости рассеяния, спектр флуоресценции имеет типичную характерную для тонкой пленки красителя форму. При положении 2 (рис. 3, синяя кривая), соответствующем *p*-поляризации, спектр флуоресценции тонкой пленки красителя, кроме основной части, соответствующей флуоресценции красителя, имеет также интенсивно сужающуюся составляющую спектра. Так, в положении 1 спектр флуоресценции гибридной структуры схож со спектром флуоресценции тонкой пленки кумарина без наночастиц, а в положении 2 – со спектром флуоресценции гибридной структуры.

Из рис. 3б следует, что зависимость интенсивности флуоресценции от энергии накачки для гибридной структуры при положении 1 и малых энергиях накачки растет линейно, а затем уходит в насыщение. При положении 2 эта зависимость растет сверхлинейно. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что излучение поляризовано.

Поляризационная зависимость для тонкой кумариновой пленки не была снята из-за очень слабого сигнала.

Заключение

Продемонстрирована работа спазера, где в качестве резонаторов выступают серебряные наночастицы, уложенные в монослой, а в качестве усиливающей среды – наномасштабная пленка молекул красителя кумарина. Для корректной интерпретации результатов была подготовлена и исследована аналогичная тонкая кумариновая пленка без наночастиц. В то время как в тонкой пленке молекул красителя кумарина интенсивность флуоресценции при энергии накачки выше 2,38 мДж практически перестает расти и уходит в насыщение, в гибридной структуре в широком спектре флуоресценции появляется узкая полоса излучения, интенсивность которой растет быстрее, чем при малых энергиях накачки.

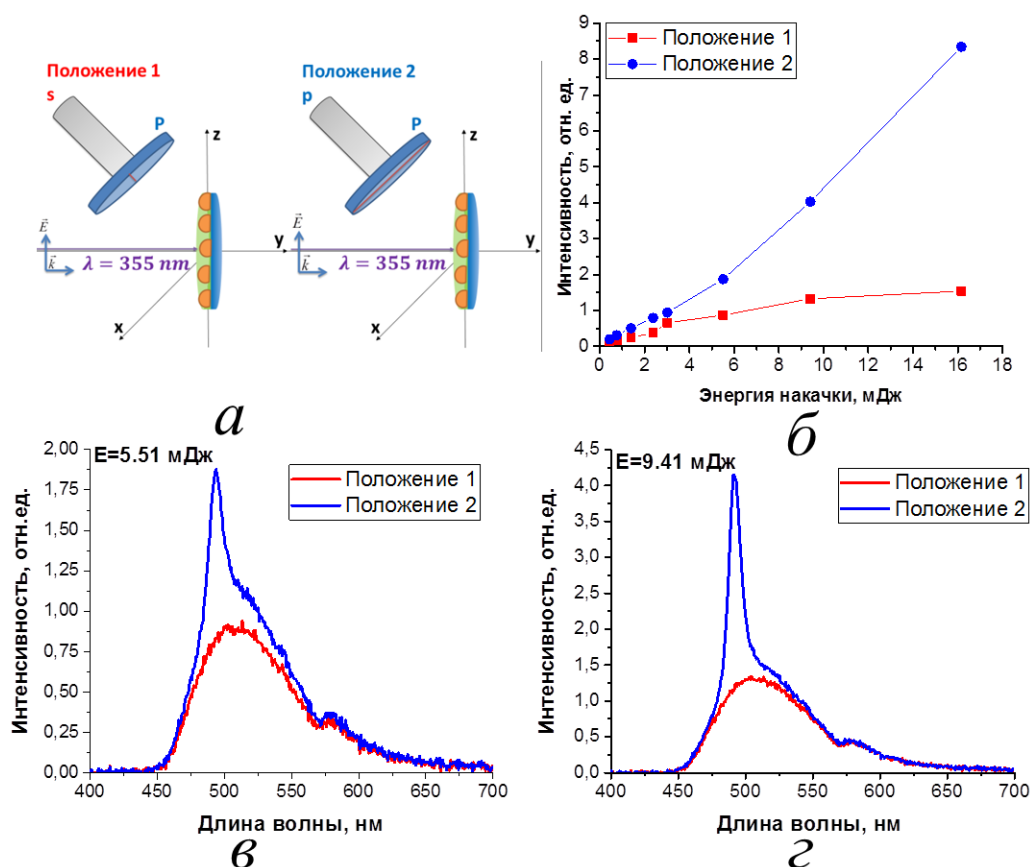


Рис. 3. Исследование поляризационной зависимости: а – схематическое представление положения поляризатора; б – зависимость интенсивности флуоресценции от энергии накачки при двух взаимно ортогональных положениях поляризатора; в и, г – сравнение спектров флуоресценции гибридной структуры при двух взаимно ортогональных положениях поляризатора и энергиях накачки, равных 5,51 мДж и 9,41 мДж соответственно

В результате для гибридной структуры имеем:

- нелинейную зависимость интенсивности флуоресценции от энергии накачки с порогом 2 мДж;
- при энергиях накачки выше порогового, новую, узкую полосу излучения в широкой полосе флуоресценции;
- узкую линию излучения, которая поляризована относительно плоскости рассеяния. В то же время флуоресценция не поляризована.

Таким образом, основываясь на полученных экспериментальных данных, можно говорить о спазерной генерации. Преимущество данной реализации спазера в том, что она представляет собой твердотельную структуру, которая работает при комнатных температурах.

Публикации

Kamaliyeva A.N. et al. Spasers monolayer based on silver nanoparticles // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10672. P. 1067224.

Литература

1. Bergman D.J., Stockman M.I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems // Physical Review Letters. 2003. Vol. 90. No 2. P. 027402.

2. *Noginov M.A. et al.* Demonstration of spaser-based nanolaser // *Nature*. 2009. Vol. 460. No 7259. P. 1110–1113.
3. *Richter M. et al.* Numerically exact solution of the many emitter-cavity laser problem: application to the fully quantized spaser emission // *Physical Review B*. 2015. Vol. 91. No 3. P. 035306.
4. *Gather M.C.* A rocky road to plasmonic lasers // *Nature Photonics*. 2012. Vol. 6. No 11. P. 708.



Клещенок Максим Андреевич
Факультет прикладной оптики
mail: mkleshchenok@corp.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КАНАЛОВ С РЕТРОРЕФЛЕКТОРАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

М.А. Клещенок

Научный руководитель – профессор В.В. Коротаев

В работе рассмотрены пути совершенствования оптико-электронных каналов контроля пространственного положения элементов турбоагрегатов. Предложена схема канала с двумя ретрорефлекторами. Исследовано влияние характеристик элементов канала на преобразование измерительной информации. Выявлена взаимосвязь параметров оптической системы с параметрами и алгоритмами работы матричного фотоприемника. Сформирована физическая модель на базе оптико-электронного канала контроля поперечных смещений. Экспериментальные исследования подтвердили требуемые характеристики каналов для цеховых условий применения.

Целью проекта является исследование и разработка распределенного оптико-электронного канала с ретрорефлекторами (РОЭКР) для контроля смещений элементов протяженных конструкций с расширенным диапазоном контроля в изменяющихся внешних условиях при заданной величине погрешности.

В мировой практике осуществляется повсеместный переход на измерительную аппаратуру нового поколения, для которой характерны малые габариты, высокий уровень автоматизации, многоканальность, цифровая фильтрация, спутниковая синхронизация, беспроводные каналы связи, анализ и обработка данных с использованием облачных технологий, питание от долгоживущих источников [1–5]. Вместе с тем, современная аппаратная база, уровень развития технических средств и технологий бесконтактного контроля объектов измерительной отрасли в РФ свидетельствуют о том, что российский измерительный сектор в технологическом отношении постепенно становится импортозависимым, и это противоречит национальным приоритетам.

Построение распределенных оптико-электронных каналов [6] контроля смещений с ретрорефлекторами (РОЭКР – полуактивная оптико-электронная система с пассивными ретрорефлекторами) на принципах «интернета вещей» обусловлено целым рядом преимуществ: распределенные вычисления и обработка информации, устойчивость

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

(адаптивность) к внешним воздействиям, широкий диапазон измерений, малое энергопотребление, встраиваемость в существующие комплексные информационные системы предприятий.

В настоящее время все больший процент промышленных измерений выполняется с использованием оптико-электронных приборов, благодаря которым появляется возможность унифицировать составляющие и реализовать адаптивный принцип построения различных схем контроля крупногабаритных инженерных объектов. Контроль протяженных конструкций – сложная техническая задача, которая эффективно решается с помощью распределенных оптико-электронных систем, которые позволяют при минимальных затратах и достаточной чувствительности в широком диапазоне измерений контролировать элементы протяженных конструкций с повышенной точностью, они адаптированы для работы в жестких условиях эксплуатации.

Особое внимание уделяется бесконтактному методу, реализуемому с помощью оптико-электронных каналов контроля смещений (ОЭККС) элементов протяженных конструкций с погрешностью контроля смещений 0,05 мм на дистанциях до нескольких десятков метров с возможностью контроля в нескольких точках. Существующие многофункциональные системы, предлагающие решение такой задачи («Leica Geosystems», «SIXENSE Soldata Inc.» и другие) – иностранные, поэтому дорогие, да еще сложные в эксплуатации. Чтобы уменьшить дефицит отечественных приборов, решающих вышеуказанную проблему, перспективно применять РОЭКР при цифровом анализе на поле матричного фотоприемника (МФП) отображений тест-объекта (ТО) в режиме реального времени.

Проведенный сравнительный анализ характеристик ОЭККС, с точки зрения эффективности использования источников энергии, адаптивности применяемых схем, а также возможности модульного исполнения, показал, что в РОЭКР, построенных по авторефлексионной схеме измерений с управляемым источником оптического излучения при цифровом анализе матричного поля МФП, можно обеспечивать заданную величину погрешности и диапазон контроля при изменяющихся внешних условиях [7–8].

С учетом сказанного были сформированы подходы к построению РОЭКР на базе авторефлексионной оптической схемы с несколькими ретрорефлекторами и показано, что структура таких РОЭКР должна содержать (рис. 1): контрольные элементы (КЭ); базовый модуль (БМ), включающий в себя оптическую систему (ОС), МФП (ПОИ) и управляемый ТО (УТО); модуль обработки и передачи информации (МОиПИ), а также канал связи (КС) с внешним вычислительным устройством (ВУ). Все элементы находятся в физической среде и имеют энергетическое обеспечение.

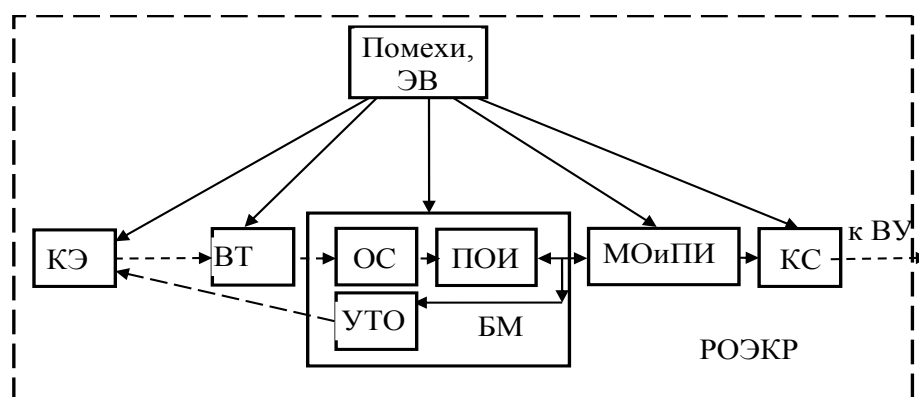


Рис. 6. Обобщенная структурная схема РОЭКР

Канал связи способен работать в режиме реального времени и обладает такими достоинствами, как информативность, точность, энергоэффективность, модульность, адаптируемость к типу требуемой схемы контроля смещений, надежность, устойчивость к воздействию негативных внешних факторов, многократность использований.

В обобщенной схеме учитываются помехи, которые оказывают влияние на элементы РОЭКР не только в форме электрических и механических, но и оптических воздействий.

Показано, что для построения эффективной схемы РОЭКР для контроля смещений отражающая оптическая система КЭ должна формировать пучок со свойством избирательной инвариантности: отдельные параметры отраженного пучка должны быть инварианты по отношению к одним пространственным координатам объекта и неинвариантны (чувствительны) к другим [9], то есть:

$$l_1 = \begin{cases} s_1(x) \\ inv(y, z, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, P, N, I...) \end{cases}, \quad l_2 = \begin{cases} s_1(y) \\ inv(x, z, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, P, N, I...) \end{cases}, \quad (1)$$

где l_1 и l_2 – параметры отраженного пучка, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ (рис. 2) – углы поворота системы координат $X_1Y_1Z_1$, внешние влияющие факторы $P, N, I...$

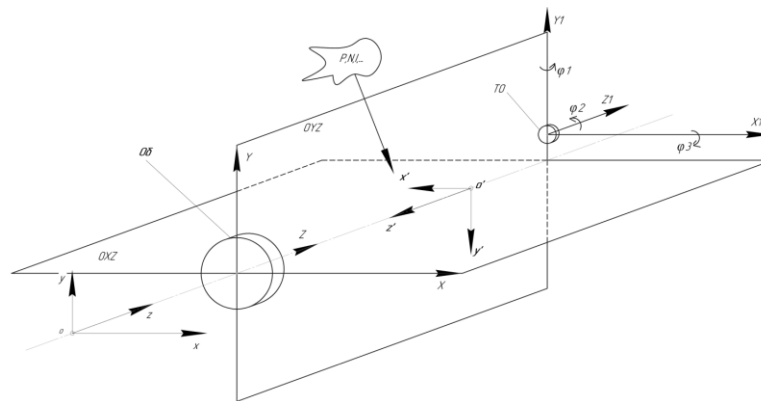


Рис. 7. К условию инвариантности в РОЭКР

Предложен адаптивный многопроходный алгоритм определения центра изображения ТО, в основе которого лежит метод нахождения максимумов модуля градиента облученности, обеспечивающий инвариантные преобразования информации при разворотах контрольного элемента (рис. 8).

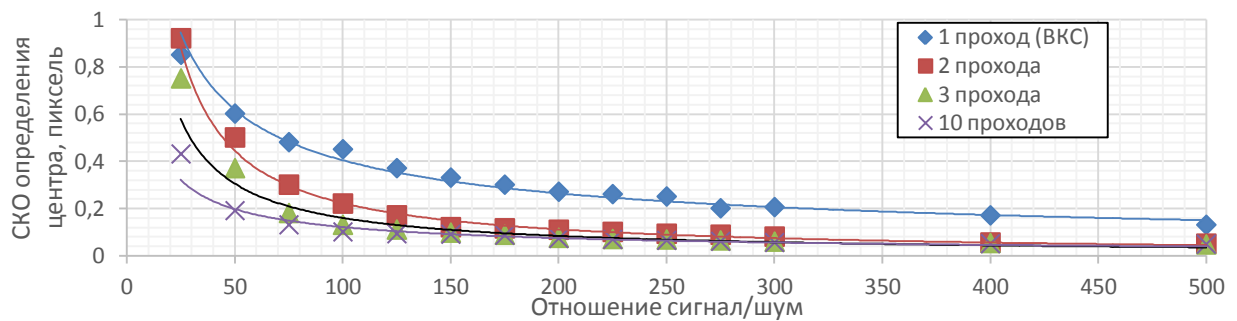


Рис. 8. Зависимость погрешности определения координат центра изображения ТО от уровня шума

Далее исследовались взаимосвязи параметров элементов РОЭКР с его характеристиками.

Предложена авторефлексионная схема с дуплексным отражателем [10–12] (рис. 4а), в которой отображения ТО (4), находящегося в базовом модуле (1), формируются в плоскости анализа МФП (2) оптической системы (3) и имеют координаты $(x'_{1МФП}, y'_{1МФП})$ и $(x'_{2МФП}, y'_{2МФП})$ (рис. 9б). Они служат основой для вычисления контролируемых смещений КЭ (5) по трем осям OX, OY, OZ :

$$x = \frac{B \cdot (x_{1МФП} + x_{2МФП})}{2 \cdot (x_{1МФП} - x_{2МФП}) \cdot \sqrt{1 + M_{yx}^2 \cdot (y_{1МФП} - y_{2МФП} / x_{1МФП} - x_{2МФП})^2}}, \quad (2)$$

$$y = \frac{B \cdot (y_{1МФП} + y_{2МФП})}{2 \cdot (y_{1МФП} - y_{2МФП}) \cdot \sqrt{1 + 1 / M_{yx}^2 \cdot (x_{1МФП} - x_{2МФП} / y_{1МФП} - y_{2МФП})^2}}, \quad (3)$$

$$z = f' \left(B / \sqrt{p_x^2 (x_{1МФП} - x_{2МФП})^2 + p_y^2 (y_{1МФП} - y_{2МФП})^2} + 0,5 \right), \quad (4)$$

где $M_{yx} = p_y / p_x$ – коэффициент линейного искажения масштаба матричного поля МФП, B – базовое расстояние.

Анализ выражений (3–5) показал, что во внешнебазной авторефлексной схеме РОЭКР с двумя ретрорефлекторами достигается погрешность контроля смещений в два раза меньше, чем в схеме с базой на ТО и одним ретрорефлектором, при равенстве баз B .

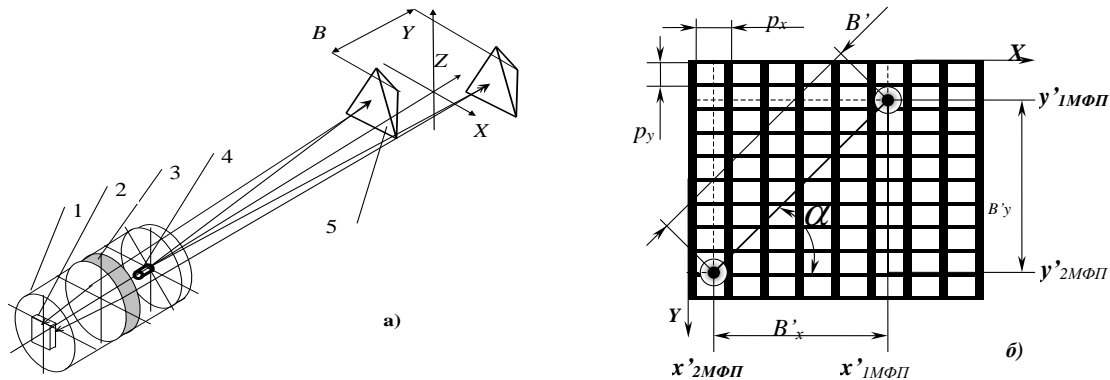


Рис. 9. Схема РОЭКР с дуплексным КЭ

Показано, что для погрешности определения центра отображения $\delta y'_{МФП}$ на выбранном МФП для диапазона смещений y и дистанций z_{max} , а также учитывая, что z_{max} много больше f' , выбор фокусного расстояния следует осуществлять по формуле:

$$f' = \frac{z \cdot \delta y'_{МФП} \sqrt{N \cdot (4y^2 + B^2)}}{\delta y \sqrt{2B}}, \quad (5)$$

где N – количество неисключенных составляющих погрешностей.

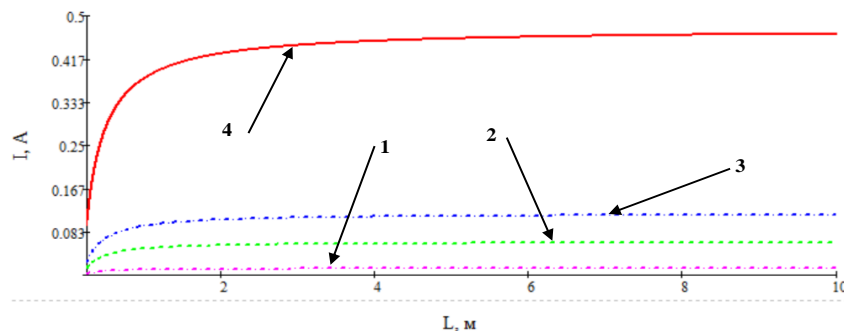


Рис. 10. Зависимость тока ТО от дистанции L при различных значениях входного зрачка: 4 – 0,016; 3 – 0,033; 2 – 0,04545; 1 – 0,1

Сформирована методика габаритно-энергетического расчета [13–14]. Показано, что размер входного зрачка вычисляется следующим образом:

$$D = \sqrt{\frac{4\pi \cdot (1 - f' / z) \cdot d_{TO}^2 \cdot \sin^2(\Theta / 2)}{\Sigma \tau \cdot K \cdot \beta \cdot (I_{TO} / f')^2}} \cdot \xi \cdot E_{e \text{ MAX}} \cdot \frac{\tau_{\text{экс}}}{T}, \quad (6)$$

где коэффициент $\frac{\tau_{\text{экс}}}{T}$ отражает использование нестандартного времени накопления МФП;

$E_{e \text{ MAX}}$ – облученность МФП; ξ – коэффициент запаса; f' – фокусное расстояние; I_{TO} – ток ТО; β – параметр, характеризующий излучающую способность полупроводникового излучающего диода (ПВД) $\sim 0,1$; K – коэффициент коррекции; τ – коэффициент пропускания оптической системы $\tau = 0,396$; $\Theta / 2$ – угол расходимости излучения ТО на половине мощности по индикатрисе рассеяния; d_{TO} – диаметр ТО $\sim 2,8$ мм; z – дистанция до объекта контроля.

Заключительный этап работы связан с анализом основных погрешностей РОЭКР. Приведена методика анализа инструментальных и эксплуатационных погрешностей, выполнены предварительные экспериментальные исследования модулей РОЭКР, приведены описания типовых конструкций модулей РОЭКР и результаты экспериментальных исследований опытного образца [15–18].

Исследование степени влияния отдельных погрешностей на суммарную проиллюстрировано рис. 6, где обозначены следующие типы погрешностей:

- 1 – от внутренних шумов МФП;
- 2 – от нерегулярности структуры матричного поля МФП;
- 3 – от фокусного расстояния объектива при изготовлении оптических деталей;
- 4 – от неточности изготовления межцентрового расстояния между ретрорефлекторами КЭ;
- 5 – от смещения энергетического центра в отображениях ТО, обусловленных погрешностями двугранных углов трипельпризм КЭ;
- 6 – от положения базового направления;
- 7 – от положения базового направления, обусловленного децентрировкой компонентов телеобъектива;
- 8 – от воздействия вертикального градиента температуры воздушного тракта;
- 9 – от разворота КЭ относительно коллимационных осей;
- 10 – от температурного воздействия на длины корпуса;
- 11 – от изменения температурного воздействия на ПВД;
- 12 – от временной деградации яркости ПВД.

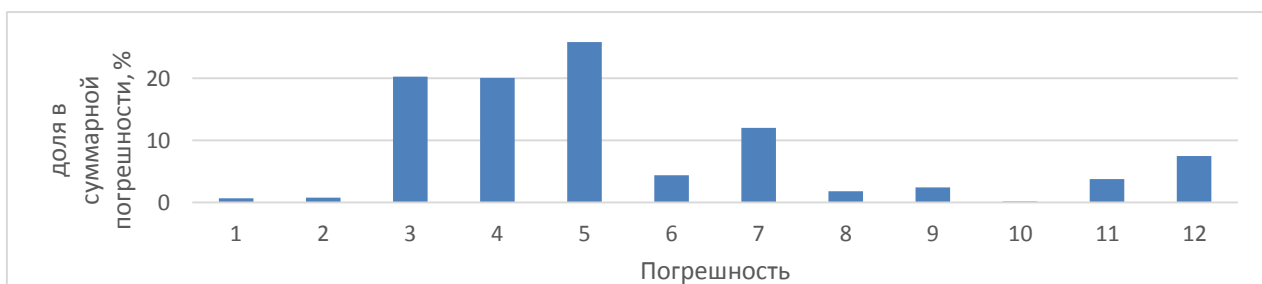


Рис. 11. Диаграмма погрешностей (процент от суммарной погрешности)

Для калибровки опытного образца «ОЭСКС-2» для различных дистанций (статические характеристики) и получения его номинальных характеристик (нелинейность и СКО основной погрешности контроля смещений) был разработан и изготовлен универсальный стенд (рис. 7).



Рис. 7. Общий вид размещения модулей опытного образца «ОЭСКС-2» на стенде испытания линейных пространственных координат (использовался дуплексный отражатель)

В результате обработки полученных данных измерений по координате X (Y) получены:

- максимальное значение систематической составляющей основной погрешности:

$$\tilde{\Delta}_{xosH} = 0,052\text{мм} \quad (\tilde{\Delta}_{yosH} = 0,073\text{мм});$$

- максимальное значение вариаций показаний $\tilde{H}_{xo} = 0,016\text{мм}$ ($\tilde{H}_{yo} = 0,023\text{мм}$);
- максимальное значение СКО случайной составляющей основной погрешности:

$$\sigma \left[\Delta_{xоН}^{\circ} \right] = 0,0320\text{мм} \quad \left(\sigma \left[\Delta_{yоН}^{\circ} \right] = 0,0460\text{мм} \right).$$

Заключение

Новизна полученных результатов заключается в подходе к формированию РОЭКР, математическом описании обработки сигналов в нем, а также методике габаритно-энергетического расчета.

Публикации

1. Пат. 25677350 Российская Федерация. Устройство измерения линейного смещения объекта / М.А. Клещенко и др. Оpubл. 10.11.2015.
2. Клещенко М.А., Тимофеев А.Н. Разработка оптико-электронной системы контроля соосности с дуплексным отражателем // X Международная конференция «Прикладная оптика – 2012»: сборник трудов конференции. СПб., 2012. Т. 1. С. 81–84.
3. Kleshchenok M.A. et al. Alignment control optical-electronic system with duplex retroreflectors // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9131. P. 91311X.
4. Клещенко М.А. и др. Оптико-электронные датчики с ретрорефлекторами для контроля пространственного положения элементов турбоагрегатов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 9. С. 771–778.

Литература

1. Aujla G.S. et al. Data offloading in 5G-enabled software-defined vehicular networks: a stackelberg-game-based approach // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. No 8. P. 100–108.
2. Pena E.H.M. et al. Anomaly detection using the correlational paraconsistent machine with digital signatures of network segment // Information Sciences. 2017. Vol. 420. P. 313–328.
3. Akyildiz I.F. et al. Wireless sensor networks: a survey // Computer Network. 2002. Vol. 38. P. 393–422.
4. Maia J.E.B. et al. A framework for processing complex queries in wireless sensor networks // SIGAPP Applied Computing Review. 2013. Vol. 13. P. 30–41.
5. Ren Q., Liang Q. Energy and quality aware query processing in wireless sensor database systems // Information Sciences. 2007. Vol. 177. No 10. P. 2188–2205.

6. *Konyakhin I.A., Turgalieva T.V.* Three-coordinate digital autocollimator // *Journal of Optical Technology*. 2013. Vol. 80. No 12. P. 772–777.
7. *Pantyushin A.V. et al.* Optoelectronic system for monitoring displacements, based on LED fiducial marks // *Journal of Optical Technology*. 2009. Vol. 76. No 8. P. 507–510.
8. *Anisimov A.G. et al.* Design and test of optoelectronic system of alignment control based on CCD camera // *Proceedings of SPIE*. 2009. Vol. 7133. P. 71333S.
9. Пат. 25677350 Российская Федерация. Устройство измерения линейного смещения объекта / М.А. Клещенок и др. Опубл. 10.11.2015.
10. *Клещенок М.А., Тимофеев А.Н.* Разработка оптико-электронной системы контроля соосности с дуплексным отражателем // X Международная конференция «Прикладная оптика — 2012»: сборник трудов конференции. СПб., 2012. Т. 1. С. 81–84.
11. *Kleshchenok M.A. et al.* Alignment control optical-electronic system with duplex retroreflectors // *Proceedings of SPIE*. 2014. Vol. 9131. P. 91311X.
12. *Anisimov A.G. et al.* Choice of the reflector for the autocollimating alignment telescope // *Proceedings of SPIE*. 2011. Vol. 8082. P. 80823E.
13. *Schöberl M. et al.* Photometric limits for digital camera systems // *Journal of Electronic Imaging*. 2012. Vol. 21. No 2. P. 020501.
14. *Зверева Е.Н., Лебедько Е.Г.* Типовые расчеты по статистическим методам обработки результатов измерений в оплотехнике. СПб., 2016. – 110 с.
15. *Андреев А.Л. и др.* Селекция изображений малоразмерных целей на неоднородном фоне в условиях помех // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 10. С. 88–93.
16. *Maraev A.A., Timofeev A.N.* Energetic sensitivity of optical-electronic systems based on polychromatic optical equisignal zone // *Proceedings of SPIE*. 2013. Vol. 8788. P. 878836.
17. *Anisimov A.G. et al.* Study of the influence of the tetrahedral reflectors properties on autocollimating systems characteristics // *Proceedings of SPIE*. 2010. Vol. 7786. P. 77860V.
18. *Клещенок М.А. и др.* Оптико-электронные датчики с ретрорефлекторами для контроля пространственного положения элементов турбоагрегатов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61. № 9. С. 771–778.



Козлов Алексей Сергеевич
Факультет безопасности информационных технологий
E-mail: zz.kozlov@gmail.com

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА СТАТИКИ И ДИНАМИКИ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.С. Козлов

Научный руководитель – профессор В.Л. Ткалич

В проекте освещен актуальный вопрос развития и совершенствования микроэлектроники, где перспективными направлениями являются разработка микроэлектромеханических систем (МЭМС) и создание конкурентоспособных устройств на

базе оболочечных чувствительных элементов. Разработанные конструкции МЭМС-акселерометра (используемые, в частности, в инерциальных системах управления летательными аппаратами, автомобильном производстве, мобильных телефонах и элементах компьютерной техники), а также чувствительный элемент микромеханического гироскопа, применяемый в интегральных гироскопах вибрационного типа, могут быть запатентованы и задействованы в устройствах, которые встречаются на объектах с повышенными требованиями к уровню безопасности и надежности, а также на стратегически важных объектах Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Актуальность выбранного направления работы обусловлена возрастающими требованиями к важнейшим параметрам, а также к метрологическим характеристикам систем управления (СУ), определяющимся качеством первичных измерительных приборов, которые формируют сигнал обратной связи. Тонкостенные оболочечные чувствительные элементы (ОЧЭ) – мембраны и сильфоны, непосредственно воспринимающие измерительную величину, являются ответственными элементами таких преобразователей и коммутационных устройств СУ.

Цель проекта – разработка методов анализа статики и динамики мембранных и сильфонных ОЧЭ МЭМС, а также ряда новых конструкций устройств на их основе. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- проведен анализ областей применения, основных тенденций и дальнейших перспектив развития ОЧЭ устройств вычислительной техники и СУ;
- осуществлены патентные исследования по вопросу проектирования мембранных и сильфонных ОЧЭ, а также классификация данной элементной базы СУ по ряду признаков;
- разработаны математические модели динамики мембранных ОЧЭ СУ;
- создана библиотека конечных элементов в приложении к тонкостенным оболочкам вращения;
- выполнен анализ динамических погрешностей мембранных ОЧЭ при комплексном воздействии динамических нагрузок;
- проведен анализ динамических и статических погрешностей мембранных ОЧЭ;
- выполнен учет присоединенных масс жидкости в математических моделях сильфонных ОЧЭ СУ;
- выполнен анализ внутреннего трения материалов сильфонных ОЧЭ СУ;
- разработана система автоматизированного проектирования ОЧЭ устройств СУ;
- разработан ряд новых конструкций устройств СУ на базе мембранных и сильфонных ОЧЭ.

Метрологические характеристики СУ во многом определяются качеством первичных преобразователей, датчиков, коммутационных устройств и различных исполнительных механизмов. Датчики на базе мембран и сильфонов широко применяются для преобразования механической величины деформации ОЧЭ в электрическую. В настоящее время наибольшее распространение среди ОЧЭ СУ получили именно мембранные и сильфонные ОЧЭ, которые задействованы в манометрах, датчиках перемещения, в различных типах регистрирующей аппаратуры и т. д. Мембранные ОЧЭ находят свое применение в конструкциях коммутирующих устройств, в частности в магнитоуправляемых контактах.

Дальнейшее развитие методов анализа статики и динамики мембранных и сильфонных ОЧЭ СУ позволит уменьшить объемы дорогостоящих экспериментов на стадии проектирования элементов данного типа. Потребность в снижении отказов при эксплуатации СУ подтверждает необходимость совершенствования методов расчета статики и динамики подобных ОЧЭ.

Большой вклад в создание и развитие методов расчета ОЧЭ внесли такие отечественные ученые, как Н.А. Алфутов (проблемы устойчивости) [1], Л.Е. Андреева (расчет манометрических трубок, мембран, сильфонов) [2], А.С. Вольмир (проблемы статики

и динамики) [3], В.П. Корсунов (витые пружины, мембраны) [4], Б.Л. Пелех (теория многослойных оболочек) [5], В.Я. Распопов (электромеханические элементы) [6], Р.М. Майзельс (герконы) [7]. Этой проблемой также занимались и зарубежные ученые, такие как Болен Ромейн (магнитоуправляемые контакты), Энтони Джей Вилкис (герконы), Э.Д. Курц (МЭМС-технологии) и другие.

Однако, несмотря на большое разнообразие научных трудов в этой области, дальнейшая разработка методов анализа статики и динамики мембранных и сильфонных ОЧЭ по-прежнему остается крайне актуальным направлением для современных устройств СУ, отвечающих высокому уровню надежности [3].

Одним из перспективных направлений является создание охранных датчиков на основе герконов, которые включают в свой состав мембранные или пластинчатые чувствительные элементы [7]. Анализ тенденций развития мирового рынка герконов выявил актуальность применения их современных типов в устройствах охранной и пожарной сигнализаций.

Потребность в повышении надежности устройств СУ делает актуальной проблему обеспечения качества мембранных и сильфонных ОЧЭ, что обуславливает потребность в развитии теоретических и эмпирических методов анализа статики и динамики данного типа элементов и ведет к необходимости создания на их основе новых видов устройств СУ.

МЭМС-акселерометры и МЭМС-гироскопы относятся к классу инерциальных датчиков с широкой областью применения [8]: от задач обеспечения поворота дисплея планшетных компьютеров до интегрированных со спутниковыми навигационными системами малогабаритных платформенных систем определения параметров ориентации и координат подвижных летательных, наземных, подводных и надводных объектов.

Анализ показывает, что основными причинами, вызывающими погрешность измерения МЭМС-акселерометра, являются температура, вибрация и перекрестное ускорение.

Так, изменения температуры окружающей среды ведут к изменению диэлектрической проницаемости, а также величины зазора между пластиной маятника и крышками.

Перекрестное ускорение ведет к дополнительной деформации упругих элементов подвеса и влияет на перемещение маятника [2, 4]. Но, так как перемещения маятников вдоль оси y совпадают с осью чувствительности, то они компенсируются датчиком момента, не внося ошибки, тогда как перемещения маятников вдоль оси z изменяют эффективную площадь перекрытия подвижных и неподвижных электродов, что может привести к случайной ошибке. Чтобы предотвратить эту погрешность, можно увеличить площадь электродов на крышке МЭМС-акселерометра.

К важнейшим параметрам МЭМС-акселерометров относятся диапазон измеряемых ускорений, чувствительность, нелинейность в процентах от полной шкалы, шумы, а также температурный дрейф нуля и чувствительности. Чувствительность акселерометра определяется резонансной частотой механической подсистемы и зависит от качества электронного преобразователя. Температурный дрейф чувствительности МЭМС-акселерометра обусловлен в основном изменением его коэффициента упругости, а также тепловым расширением. На него оказывают влияние и технологические погрешности, возникающие при изготовлении датчика.

Физическая модель акселерометра представляет собой подвешенную на пружине инерционную массу с одной степенью свободы вдоль измерительной оси. Его инерционная масса, например модели *LSM303DLH*, под действием ускоряющей силы приобретает ускорение, пропорциональное массе m и ускорению \vec{a} . К основным характеристикам таких акселерометров относятся: напряжение питания, смещение нуля, температурный дрейф, плотность шума и диапазон рабочих температур.

МЭМС-сенсоры обладают малыми массогабаритами, низкими энергопотреблением и стоимостью, высокой вибро- и ударопрочностью. Однако их недостатком является не всегда высокая точность, что обусловлено, в том числе, и отсутствием адекватных

математических моделей погрешностей этих устройств. Для гироскопов и акселерометров МЭМС-индустрии основными технологическими характеристиками являются: динамический диапазон, чувствительность, частотный отклик и шумовые составляющие [9, 10]. Для определения систематических погрешностей при калибровках возможно обеспечить достаточную степень точности фиксации микросхем на наклонно-поворотном столе, что позволяет хорошо ориентировать оси акселерометров относительно земной оси. При расчете систематической погрешности также необходимо учитывать коэффициенты влияния температуры и напряжения питания.

Публикации

1. Kozlov A.S. et al. Development of computer-aided design system of elastic sensitive elements of automatic metering devices [Electronic resource] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 052018. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052018> (accessed: 09.03.2019).
2. Kozlov A.S. et al. Development library of finite elements for computer-aided design system of reed sensors // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 032080. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032080> (accessed: 09.03.2019).
3. Kozlov A.S. et al. Analysis of errors in micromechanical devices // 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2018): Proceedings. Novosibirsk, 2018. Vol. 1. No 6. P. 272–276.
4. Козлов А.С. и др. Анализ погрешностей микромеханических гироскопов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: https://openbooks.ifmo.ru/ru/collections_article/7192/analiz_pogreshnostey_mikromehnicheskikh_giroskopov.htm (дата обращения: 09.03.2019).
5. Козлов А.С. и др. Разработка новых устройств на базе упругих чувствительных элементов с повышенными показателями надежности и улучшенными метрологическими характеристиками [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: https://openbooks.ifmo.ru/ru/collections_article/5014/razrabotka_novyh_ustroystv_na_baze_uprugih_chuvstvitelnyh_elementov_s_povyshennymi_pokazatelyam (дата обращения: 09.03.2019).
6. Козлов А.С. и др. Разработка математической модели погрешностей акселерометра [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: https://openbooks.ifmo.ru/ru/collections_article/7178/razrabotka_matematiceskoy_modeli_pogreshnostey_akselerometra.html (дата обращения: 09.03.2019).
7. Козлов А.С. и др. Применение оптоволоконных и термочувствительных элементов в системах охраной и пожарной сигнализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 4. С. 356–359.
8. Пат. 181216 Российская Федерация. Интегральный микромеханический гироскоп / А.С. Козлов и др. Оpubл. 06.07.2018.
9. Пат. 181219 Российская Федерация. Чувствительный элемент микромеханического гироскопа / А.С. Козлов и др. Оpubл. 06.07.18.
10. Пат. 182447 Российская Федерация. Термочувствительный датчик / А.С. Козлов и др. Оpubл. 17.08.18.

Литература

1. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М., 1978. – 312 с.
2. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М., 1981. – 455 с.
3. Вольмир А.С. и др. Статика и динамика сложных структур: прикладные многоуровневые методы исследований. М., 1989. – 248 с.

4. Корсунов В.П. Упругие чувствительные элементы (статика, динамика, надежность). Саратов, 1980. – 320 с.
5. Пелех Б.Л. Обобщенная теория оболочек. Львов, 1978. – 159 с.
6. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. М., 2007. – 400 с.
7. Майзельс Р.М., Шоффа В.Н. Герконы. Взгляд на перспективы направления // Электротехника. 1998. № 1. С. 20–25.
8. Косолапов И.А. Междисциплинарные связи в многомасштабном моделировании микрооптоэлектромеханических систем // Сборник трудов XIII Международной молодежной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы – 2011». М., 2011. С. 206–210.
9. Варадан В.К. и др. ВЧ МЭМС и их применение. М., 2004. – 528 с.
10. Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: учеб. пособие: в 2 ч. Новосибирск, 2004. Ч. 1. – 416 с.



Колгушкина Светлана Владимировна
Факультет лазерной и световой инженерии
E-mail: svkolgushkina@corp.ifmo.ru

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

С.В. Колгушкина

Научный руководитель – профессор В.Т. Прокопенко

В ходе исследования рассматривался метод комплексного анализа распределения яркости в поле зрения наблюдателя в условиях городской среды. В процессе осуществления фотометрической оценки была проанализирована градостроительная структура объектов города на примере Санкт-Петербурга. На основании разработанной методики в соответствии с целевым назначением объектов – получен совокупный анализ качества освещения для выбранных поперечных сечений различных районов города.

Для крупных городов России актуальным направлением фотометрических исследований является комплексный анализ яркостных характеристик существующей световой среды в поле зрения наблюдателя, а также их качественная оценка в зависимости от вида зрительной задачи. Важность оценки суммарного вклада воздействий заключается в том, что проверка вводимых в эксплуатацию объектов происходит локально (не рассматривается в масштабе города), то есть не осуществляется контроль качества существующей световой среды. Без контроля яркостных характеристик города становятся перенасыщенными освещением, количество объектов с нерационально выполненным освещением с каждым годом возрастает в геометрической прогрессии.

Цель исследования – актуализация и дополнение существующих в России качественных и количественных критериев нормирования яркостных характеристик путем

исследования расширенного набора параметров и применения метода комплексной оценки распределения яркости.

Задачи:

- актуализация существующих подходов к анализу распределения яркости в поле зрения наблюдателя с учетом возможностей современных измерительных средств;
- оценка яркостных характеристик объектов на примере Санкт-Петербурга в совокупности с предварительно проведенным градостроительным анализом;
- анализ полученных данных с целью актуализации нормируемых количественных и качественных характеристик освещения и выявления проблемных участков.

В связи с многокомпонентностью световоспринимающего аппарата и наличием обратных связей между центральным и периферическим звеном зрительного анализатора относительная спектральная световая эффективность глаза наблюдателя зависит от условий наблюдения. Зависимость обнаруживается при вариациях яркости излучения в широких пределах и во всех разновидностях неустановившихся процессов.

Необоснованно забытый метод построения комплексного критерия качества может быть доработан с учетом обновленной градостроительной иерархии пространств и возросшими возможностями измерительных инструментов, которые появились в ходе научно-технического прогресса [1, 2].

Несмотря на то, что на сегодняшний день нормирование освещаемых объектов осуществляется в соответствии с документом СП 52.13330.2016, реализуемые осветительные установки в городах России зачастую не отвечают основным целям нормирования искусственного освещения: не обеспечиваются комфортные и безопасные условия восприятия, энергетические ресурсы расходуются нерационально [3, 4].

В силу того, что яркость является световой величиной, значение которой зависит от направления наблюдения, ее распределение в поле зрения наблюдателя напрямую влияет на характер формируемого зрительного ощущения. Из всех световых величин, количественно описывающих условия освещения, именно анализ яркостных характеристик объектов в поле зрения наблюдения и условий адаптации позволяет оценить механизм восприятия, поскольку от величин яркости объектов наблюдения и диаметра зрачка зависит освещенность на сетчатой оболочке глаза [5]:

$$E_c = 0,27 \cdot e^{-2\tau} \cdot B \cdot D^2,$$

где E_c – освещенность сетчатки, B – яркость объекта наблюдения, τ – коэффициент пропускания глазных сред.

В исследовании применялся прямой метод детального анализа распределения яркости по полю зрения с использованием оптико-электронного прибора «*LMK Mobile Advanced*» на основе ПЗС-матрицы с применением специализированного программного обеспечения «*LMK LabSoft*», необходимого для оценки расширенного количества параметров, которые на данный момент не являются нормируемыми, но влияют на зрительное восприятие водителей и пешеходов в городской среде в вечернее время.

В ходе градостроительного анализа на примере Санкт-Петербурга была получена иерархия пространств и разработаны основные поперечные сечения улиц для фотометрических измерений. Пример улиц, выбранных для фотометрических измерений, представлен на рис. 1, 2.

Логическое разделение нормируемых уровней яркости дорожного покрытия, элементов фасадов и рекламных объектов в зависимости от категории дорог несет в себе глубинный смысл, поскольку именно при соблюдении грамотного баланса яркости горизонтальных и вертикальных поверхностей в поле зрения наблюдателя не происходит существенных изменений в условиях адаптации глазного анализатора [3, 5]. В случае же постоянных изменений условий восприятия или отсутствия взаимоувязанности по яркости горизонтальных и вертикальных поверхностей наблюдения глаз вынужден подстраиваться

под быструю смену условий восприятия, что влияет на быстроту реакций и на состояние утомления. Примеры обработанных в программе «*LMK LabSoft*» изображений представлены на рис. 3. По ним видно, насколько различными по характеру распределения яркости в поле зрения являются существующие условия восприятия объектов в городской среде.

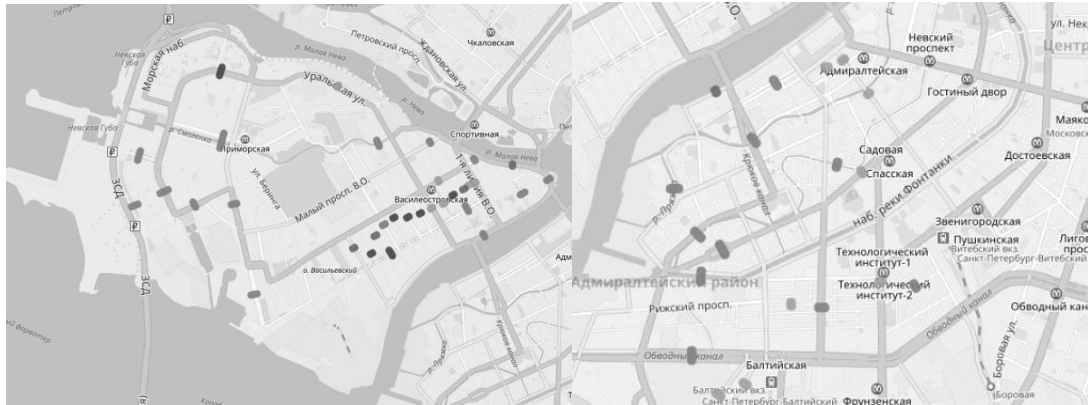


Рис. 1. Выбор поперечных сечений для фиксации фотометрических характеристик



Рис. 2. Анализ функциональных зон на примере поперечного сечения

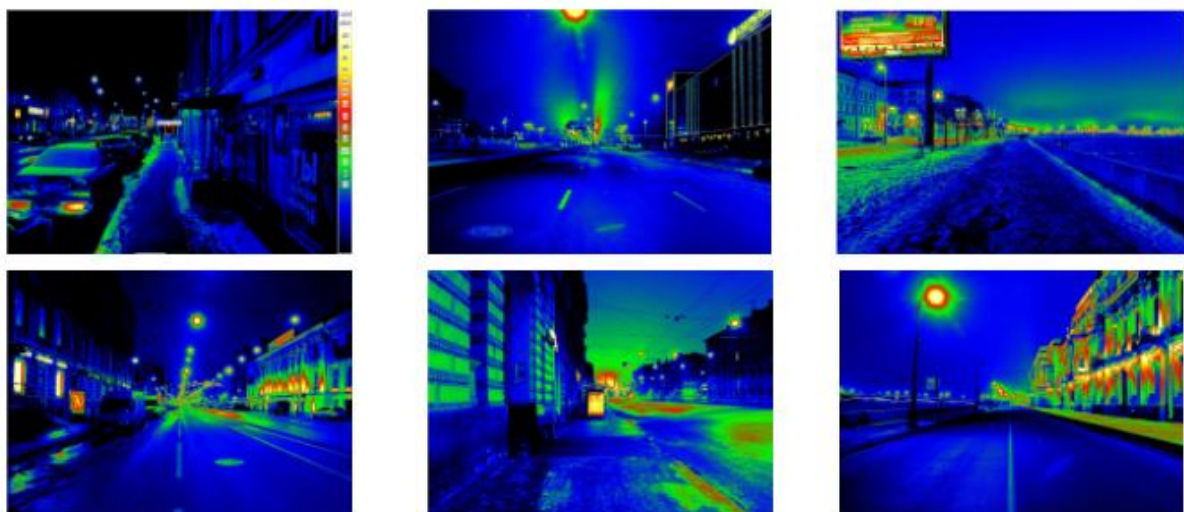


Рис. 3. Фотометрический анализ существующей световой среды, с точки зрения водителя и пешехода, обработка в программе «*LMK LabSoft*»

Качественная оценка световой среды в рамках данной работы связана с совокупным анализом выделенных в Таблице параметров по следующей формуле, основанной на методах оценки уровня качества [1]:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i \cdot P_i$$

где P_i – i параметр цветоцветовой среды, a_i – взвешивающий коэффициент i -го параметра. В данном случае оценивался средневзвешенный вклад каждого из выделенных параметров в относительных единицах.

Таблица

Исследуемые характеристики

| Водитель | Пешеход |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Средняя яркость дорожного полотна | Средняя яркость тротуара |
| Продольная равномерность яркости | Общая равномерность яркости |
| Общая равномерность яркости | Яркость центрального поля зрения |
| Видимость | Яркость периферии |
| Яркость центрального поля зрения | Яркость адаптации |
| Яркость периферии | Пороговая разность яркости |
| Яркость адаптации | Вуалирующая яркость |
| Вуалирующая яркость | Показатель дискомфорта |
| Пороговое приращение яркости | |

Полученные значения для пятидесяти трех поперечных сечений одного из районов Санкт-Петербурга представлены на рис. 4.

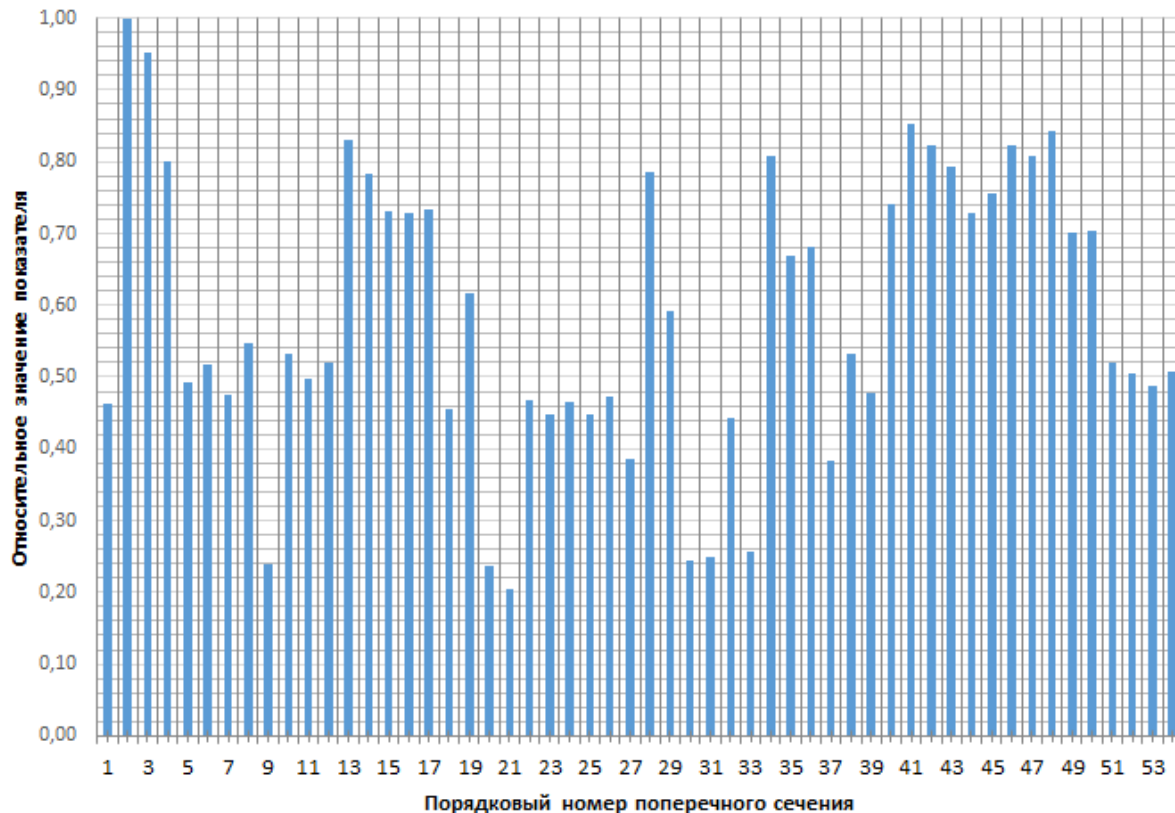


Рис. 4. Комплексные критерии для разных поперечных сечений и точек зрения наблюдателя

С помощью программы «*LMK LabSoft*» обработано 2458 данных измерений. Данные измерений для каждого объекта городской инфраструктуры были введены в базу данных. Их анализ позволил сделать выводы о качественно выполненных решениях существующей световой среды, а также выявить проблемные области, повышающие важность реорганизации освещения объекта.

В результате исследования было выявлено 289 проблемных областей. Комплексный метод оценки распределения яркости напрямую связан с анализом качества зрительного восприятия и требует дальнейшей доработки и апробации, с точки зрения методов оценки качества светового решения.

Важность внедрения метода комплексной оценки качества распределения яркости в городской среде связана с тем, что существующие регулирующие документы и стандарты, которые определяют методы измерения, сосредоточены на проверке нескольких локальных характеристик световой среды, в то время как поле зрения наблюдателя с каждым днем становится все более перенасыщенным.

Публикации

1. *Kolgushkina S.V. et al.* Night sky background brightness estimation by the example of the St. Petersburg city // *Light & Engineering*. 2018. Vol. 26. No 1. P. 127–130.
2. *Колгушкина С.В., Прокопенко В.Т.* Комплексное исследование распределения яркости в поле зрения на примере центральных улиц города Тулы [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: <https://openbooks.ifmo.ru/ru/file/8249/8249.pdf> (дата обращения: 16.10.2018).
3. *Kolgushkina S.V.* Sky brightness measurements for different environmental conditions by the example of St. Petersburg // *SHS Web of Conferences*. 2018. Vol. 43. P. 01010.
4. *Kolgushkina S.V.* Artificial light emission analysis for the city of St. Petersburg // *SHS Web of Conferences*. 2018. Vol. 43. P. 01011.
5. *Колгушкина С.В. и др.* Оценка яркости фонового свечения ночного неба на примере Санкт-Петербурга // *Светотехника*. 2017. № 4. С. 68–70.

Литература

1. *Лебедкова С.М., Матвеев А.Б.* О комплексной оценке качества цветоцветовой // *Светотехника*. 1984. № 9. С. 1–3.
2. *Мешков В.В., Матвеев Б.А.* Основы светотехники: учеб. пособие для вузов: в 2 ч. М., 1989. Ч. 2: Физиологическая оптика и колориметрия. – 432 с.
3. *Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга.* 3-е изд., перераб. и доп. М., 2006. – 972 с.
4. *Быстрянцева Н.В.* Развитие теории световой среды вечернего города // *Светотехника*. 2012. № 5. С. 60–63.
5. *Van Bommel W.* Road lighting: fundamentals, technology and application. Springer, 2015. – 334 p.



Коннов Кирилл Александрович
Факультет лазерной фотоники и оптоэлектроники
E-mail: kirillkonnov1991@gmail.com

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО УЗКОПОЛОСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

К.А. Коннов

Научный руководитель – доцент С.В. Варжель

В ходе исследования осуществлялась разработка и создание перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе волоконных решеток Брэгга. В качестве базового элемента устройства применялись волоконные дифракционные структуры с фазовым сдвигом. Подстройка центральной длины волны осуществлялась путем изменения внешнего воздействия на решетку. Разработанное устройство позволяет реализовать модификацию спектральных характеристик источников излучения, применяемых при создании различных волоконно-оптических приборов и комплексов.

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) находят широкое применение в приборостроении при создании телекоммуникационного оборудования, датчиков физических параметров, систем мониторинга, навигационной техники, лазерных систем и т. д. В настоящее время особый интерес представляют их специальные структуры: суперпозиции, наклонные решетки, решетки с фазовым сдвигом и прочие. В частности, благодаря особенностям спектральных характеристик целый ряд применений нашли ВБР с фазовым сдвигом.

ВБР с фазовым сдвигом – структура, в периоде которой присутствует сдвиг Λ_s (рис. 1а). Такая конфигурация дифракционной решетки приводит к появлению узкополосной области пропускания в ее спектре отражения (рис. 1б).

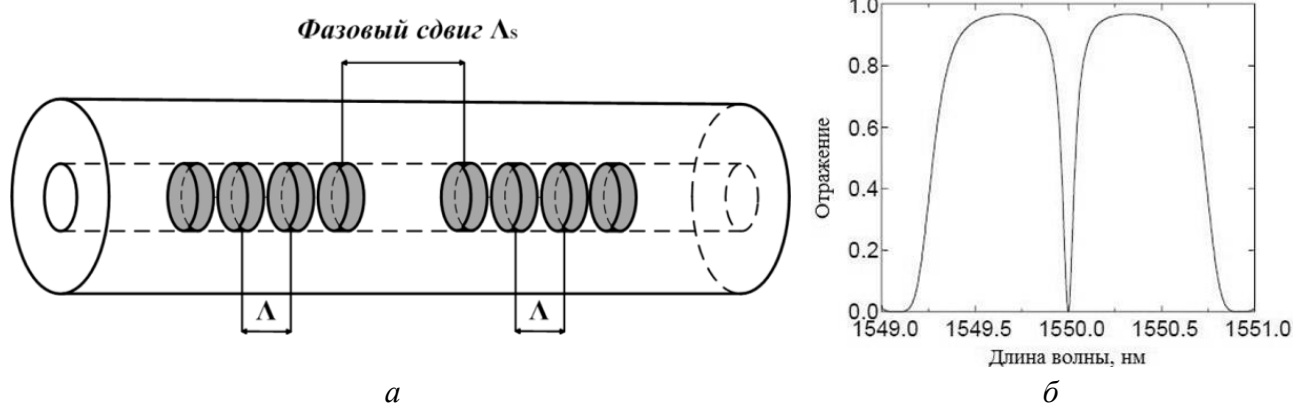


Рис. 1. а – схематическое изображение ВБР с фазовым сдвигом; б – модель спектра отражения ВБР с фазовым сдвигом

Указанная особенность структур данного типа дает возможность их применения в качестве узкополосных спектральных фильтров.

Кроме того, интерес представляет тот факт, что ВБР (а именно их спектральные характеристики) имеет высокую чувствительность к внешним воздействиям. Например, изменение температуры окружающей среды приводит к изменению ее центральной длины

волны резонанса. К подобным эффектам приводят и многие другие внешние воздействия (сжатие и растяжение оптического волокна, изменение поперечного давления на решетку и т. д.) [1].

Стоит отметить, что изменение внешнего воздействия также приводит к сдвигу спектра отражения ВБР с фазовым сдвигом, а значит, и к изменению центральной длины волны области пропускания в спектре отражения структуры. Следовательно, решетки такого типа могут быть использованы для создания узкополосных спектральных фильтров с возможностью подстройки их центральной длины волны.

Целью данной работы являлись разработка и создание перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе ВБР с фазовым сдвигом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- разработать методику создания ВБР с фазовым сдвигом, позволяющую осуществлять подбор ширины области пропускания в спектре отражения таких структур;
- изготовить образцы ВБР с фазовым сдвигом с различными параметрами;
- разработать методику, позволяющую осуществлять точную подстройку центральной длины волны узкополосного спектрального фильтра на основе ВБР;
- изготовить макетный образец перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе ВБР;
- провести экспериментальные исследования образца перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе ВБР.

Для записи ВБР с фазовым сдвигом в работе использовался лабораторный стенд на основе интерферометра Тальбота [2]. В качестве источника излучения с длиной волны 248 нм в установке применялась *KrF*-эксимерная лазерная система типа «задающий генератор-усилитель мощности» [3].

Ширина области пропускания в спектре отражения ВБР с фазовым сдвигом может изменяться в пределах от единиц до десятков пм, а увеличение длины структуры и глубины модуляции показателя преломления приводит к ее уменьшению [4].

В случае, когда величина сдвига Λ_s равна нечетному числу полупериодов (соотношение 1) структуры, узкополосный провал находится в центре спектра отражения решетки:

$$\Lambda_s = (2k + 1) \frac{\Lambda}{2}, \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, n$, Λ – период структуры.

В настоящее время для записи ВБР с фазовым сдвигом чаще всего применяются специализированные фазовые маски [5] или высокоточные линейные моторизованные подвижки [6]. Первый вариант накладывает ограничения как на длину записываемых структур, так и на возможность изменения их периода. Используемые во второй методике линейные подвижки, точность которых позволяет выполнить поставленную задачу, существенно усложняют процесс и делают его дорогостоящим. Их применение должно сопровождаться внедрением в схему записи интерферометрических систем контроля положения оптического волокна.

В работе предложена оригинальная методика контроля параметров фазового сдвига между двумя ВБР с идентичными характеристиками, записанными в один образец оптического волокна путем воздействия электрического дугового разряда на область световода между решетками (получен приоритет по заявке на патент № 2018102806 от 24.01.2018 «Способ формирования волоконной брэгговской решетки (ВБР) с фазовым сдвигом»; Новикова В.А., Коннов К.А., Грибаев А.И., Варжель С.В.).

В ходе проведения исследования выявлены зависимости изменения ширины области пропускания в спектре отражения решеток с фазовым сдвигом, записанных с помощью предложенной методики, для двух глубин модуляции показателя преломления при

изменении длины структур. На рис. 2 приведены экспериментально полученные данные (черные точки), их аппроксимирующие кривые (сплошные линии) и результаты проведенного моделирования (пунктирные линии). Линиям синего цвета соответствует глубина модуляции показателя преломления дифракционных решеток $0,7 \cdot 10^{-4}$, зеленым - $1,4 \cdot 10^{-4}$. Длина структур изменялась от 4 до 28 мм.

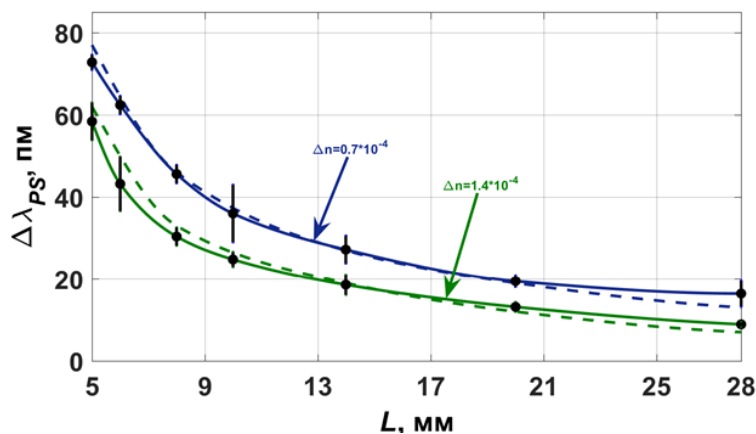


Рис. 2. Зависимости ширины узкополосного провала на полувысоте от длины ВБР с фазовым сдвигом

На основании полученных результатов можно говорить о том, что разработанная методика создания ВБР с фазовым сдвигом позволяет получить структуры с минимальной шириной области пропускания в спектре отражения порядка 8 пм для глубины модуляции показателя преломления решетки $1,4 \cdot 10^{-4}$.

В ходе проведения эксперимента по применению температурной подстройки центральной длины волны фильтра, ВБР с фазовым сдвигом закреплялись на элементе Пельтье, который позволяет осуществлять изменение температуры структуры. Схема измерительной установки представлена на рис. 3а, а на рис. 3б – зависимость изменения центральной длины волны спектра отражения ВБР относительно ее начального значения при различных значениях температуры. Измерение спектральных характеристик осуществлялось в диапазоне температур 42–92 °С с шагом в 10 °С. Как видно из представленного графика, увеличение температуры приводит к сдвигу центральной длины волны в длинноволновую область спектра.

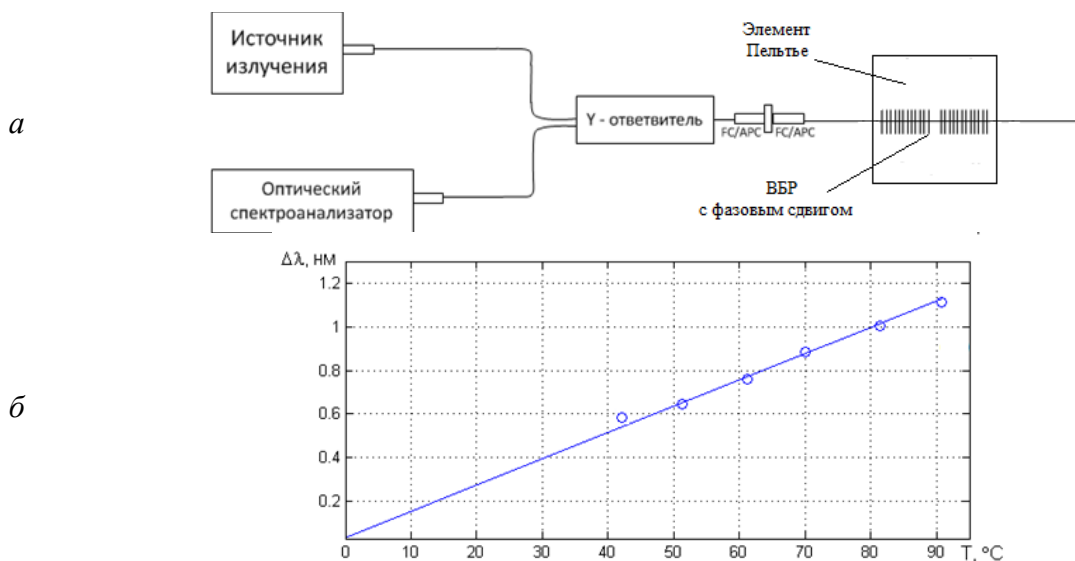


Рис. 3. а – схема установки для температурных испытаний; б – сдвиг центральной длины волны ВБР с фазовым сдвигом относительно начального положения при изменении ее температуры

На завершающем этапе проведены эксперименты по определению влияния приложенных механических напряжений (растяжение оптического волокна) на положение центральной длины волны решеток с фазовым сдвигом. Испытания проводились на установке, схематическое изображение которой представлено на рис. 4а. На рис. 4б приведены спектры отражения ВБР с фазовым сдвигом без приложения механических напряжений (синяя линия) к оптическому волокну и при его растяжении с силой 4 Н (красная линия). Как видно из представленных данных, при растяжении световода происходит сдвиг резонанса в длинноволновую часть спектра. При приложении силы 4 Н смещение составило 4,86 нм. Также стоит отметить, что внешнее механическое воздействие не оказывает существенного влияния на форму спектра структуры.

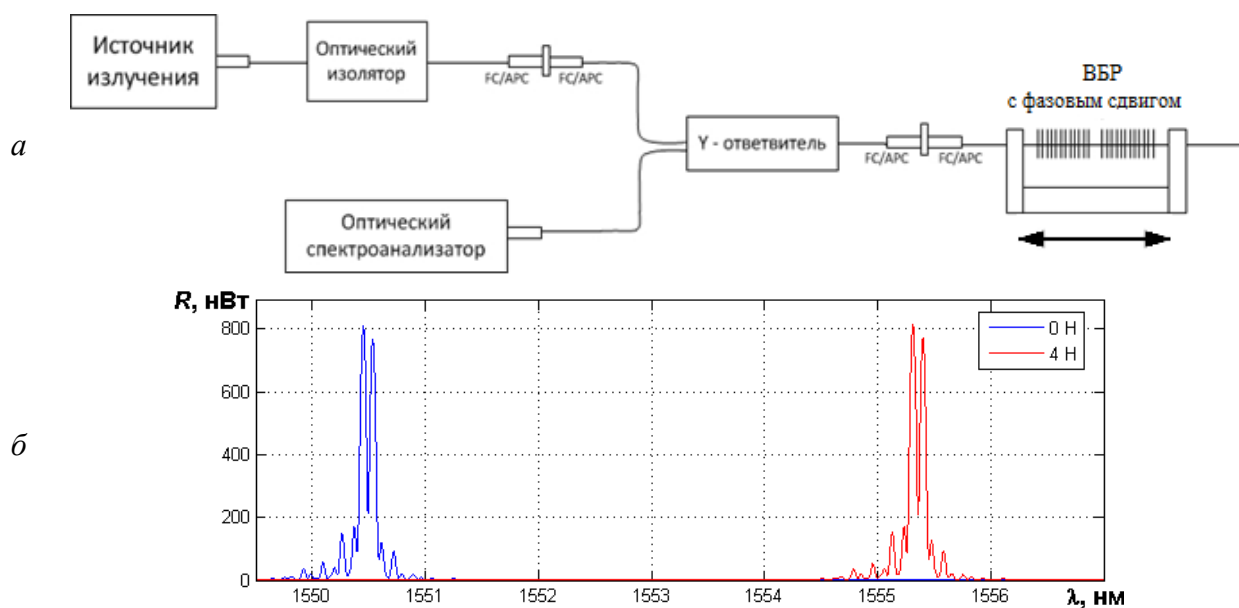


Рис. 4. а – схема установки механических испытаний; б – изменение спектра отражения ВБР с фазовым сдвигом при растяжении оптического волокна

Опираясь на выше изложенные данные, можно сделать вывод о применимости предложенных методов температурной и механической подстройки узкополосного спектрального фильтра на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом. Предложенные способы позволяют осуществлять контролируемый сдвиг центральной длины волны дифракционной решетки показателя преломления, при этом не оказывая существенного негативного влияния на форму спектров отражения и пропускания таких структур.

В ходе выполнения настоящего проекта разработан и создан перестраиваемый узкополосный спектральный фильтр на основе волоконных решеток Брэгга.

Для достижения основного результата были решены следующие задачи:

- разработана оригинальная методика создания волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом, позволяющая осуществлять подбор ширины области пропускания в спектре отражения таких структур;
- изготовлены образцы волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом с различными параметрами;
- разработаны методики, позволяющие осуществлять точную подстройку центральной длины волны узкополосного спектрального фильтра на основе волоконных решеток Брэгга;
- изготовлен макетный образец перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе волоконных решеток Брэгга;
- проведены экспериментальные исследования образца перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе волоконных решеток Брэгга.

Публикации

1. Справка о приоритете заявки на изобретение 2018102806 Российская Федерация. Способ формирования волоконной брэгговской решётки (ВБР) с фазовым сдвигом / К.А. Коннов и др. Опубл. 24.01.2018.
2. *Konnov K.A. et al.* Phase-shifted fiber Bragg gratings fabrication method // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038. P. 012095.

Литература

1. *Васильев С. А. и др.* Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103.
2. *Gribaev A.I. et al.* Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48. No 12. P. 540.
3. *Атежеев В.В. и др.* Эксиммерный лазер с высокой когерентностью // Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 8. С. 689–694.
4. *Berger N.K. et al.* Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating // Optics Express. 2007. Vol. 15. No 2. P. 371–381.
5. *Kashyap R. et al.* UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibers using phase-shifted phase masks // Electronics Letters. 1994. Vol. 30. No 23. P. 1977–1988.
6. *Chehura E. et al.* A simple method for fabricating phase-shifted fibre Bragg gratings with flexible choice of centre wavelength // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7503. P. 750379.



Кулишов Борис Александрович
Факультет пищевых биотехнологий и инженерии
E-mail: kulishov.b@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА АППАРАТА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ВЫПЕЧКИ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Б.А. Кулишов

Научный руководитель – профессор А.Г. Новоселов

Работа посвящена исследованию процесса электроконтактной (ЭК) выпечки хлебобулочных изделий экспериментальным способом. Для осуществления проекта разработан лабораторный образец печи для проведения ЭК-выпечки. Установлено, что концентрация соли напрямую связана с увеличением максимального значения силы тока и уменьшением длительности выпечки. Затраты энергии на выпечку ЭК-способом примерно в 8–13 раз меньше, чем на выпечку в конвективных печах.

Развитие современной пищевой промышленности, в частности хлебопекарной отрасли, характеризуется разработкой новых видов продукции повышенной пищевой ценности, диетического и функционального назначения, из нетрадиционных видов сырья, а также произведенных с помощью высокоэффективных методов обработки.

Структура потребления хлебобулочных изделий на сегодняшний день состоит из традиционных сортов и новых видов продукции с более сложной рецептурой, повышенной пищевой ценностью и прочее. Доля традиционного хлеба в структуре потребления остается постоянной и составляет около 50 % [1].

Упомянутые тенденции развития отрасли обуславливают интерес к способам обработки сырья, которые позволяют сохранить максимально возможное количество полезных нутриентов, получать продукт высокого качества, соответствующий современным стандартам безопасности.

Длительность выпечки в современных хлебопекарных печах составляет не менее 25–28 минут в зависимости от производительности, типа и конструктивных особенностей печи. Процесс нагрева теста посредством конвекции является малоэффективным и энергоемким. На процесс нагрева и выпечки теста расходуется 35–45 % всей затраченной энергии, оставшаяся часть расходуется на нагрев форм, воздуха, элементов печи, а также рассеивается в окружающую среду [3].

Исследование более быстрых и менее энергоемких способов выпечки при условии сохранения качества представляет интерес с промышленной точки зрения.

Существует электроконтактный метод выпечки хлеба (ЭК-выпечка). Суть его заключается в пропускании через тестовые заготовки переменного тока промышленной частоты. Тесто выпекается до состояния хлеба за счет выделения теплоты при прохождении электрического тока. При этом тепловая энергия поступает в тестовую заготовку «изнутри», поэтому все потери энергии значительно меньше. Данный способ выпечки позволяет получать хлеб без корки, поскольку максимальная температура выпечки не превышает 100 °С [4].

Отличительные особенности электроконтактной выпечки хлеба:

- уменьшение длительности выпечки в 4–8 раз благодаря интенсивному, малоинерционному и равномерному в объеме нагреву;
- уменьшение потребления энергии на процесс выпечки, поскольку нагревается только тесто, а не формы, элементы печи и теплоноситель в виде воздуха;
- увеличение сохранности полезных нутриентов и витаминов хлеба благодаря более низкой температуре выпечки;
- уменьшение количества нежелательных и вредных веществ, образующихся в корке при выпекании из-за ее отсутствия;
- возможность проведения расстойки теста перед выпечкой в том же аппарате с использованием тока меньшего напряжения [2, 4].

Цель данной работы: исследование способа ЭК-выпечки для производства хлебобулочных изделий функционального и диетического назначения, а также хлеба-полуфабриката в условиях частных хлебопекарен и хлебозаводов малой мощности.

Задачи работы:

- экспериментальное исследование ЭК-выпечки хлебобулочных изделий различных рецептур;
- разработка оптимальной конструкции ЭК-печи многосекционного типа;
- апробация и усовершенствование ЭК-печи с целью увеличения производительности и расширения возможностей аппарата;
- разработка технологических рекомендаций по выпечке и расстойке хлебобулочных изделий ЭК-способом.

Эксперименты по ЭК-выпечке проводились в виде последовательности из следующих стадий:

- подготовка сырья, замес теста;
- брожение теста;
- разделка теста на тестовые заготовки;

- расстойка теста;
- выпечка в ЭК-печи.

В качестве основного сырья использовалась коммерчески доступная мука I сорта (влажность 12,5 % масс.), соль (помол экстра), вода, дрожжи инстантные. Рецепт теста приведена в Табл. 1.

Приготовление теста для выпечки в электроконтактной печи проводилось следующим образом. Мука просеивалась, взвешивалась. Необходимая масса соли взвешивалась, после чего соединялась с 70 мл воды, предназначенной для замеса теста. Дрожжи хлебопекарные инстантные взвешивались и смешивались с мукой. Все компоненты, кроме воды, смешивались в деже тестомесильной машины (*Sigma, model SLA 40, Italia*), после чего происходил замес с постепенным добавлением всей воды. Температура воды составляла 36 ± 1 °С.

Таблица 1
Рецептура теста

| Наименование компонента | Масса, г |
|-------------------------|----------|
| Мука пшеничная I сорт | 1000 |
| Соль | m_c^* |
| Дрожжи сухие | 5 |
| Вода | 565 |

* m_c – масса соли различна для опытов.

После замеса тесто проходило стадию брожения при температуре 30 °С и относительной влажности воздуха 70 % в течение двух часов (*Miwe Aero, model AE 6.06.04, Germany*). По истечении первого часа производилась обминка теста вручную. После завершения стадии брожения тесто подвергалось формованию. Для успешной выпечки формовалась круглая тестовая заготовка массой 650 ± 10 г, от нее отрезались боковые части под размер на 10 мм больше расстояния между электродами, формируя заготовку массой 570 ± 10 г для серии опытов при межэлектродном расстоянии 101 мм. Для опытов при расстоянии между электродами 90 мм использовались круглые заготовки массой 610 ± 10 г и отрезанные заготовки 530 ± 10 г соответственно.

Тестовая заготовка помещалась в печь так, чтобы отрезанные стороны заготовки имели плотный контакт с электродами. После укладки тестовые заготовки в ЭК-печи подвергались расстойке в расстоечном шкафу (*Miwe Klima, type MGT, Germany*) при температуре 40 °С и относительной влажности 80 % в течение часа.

Последний этап – выпечка тестовых заготовок после расстойки – проходила при напряжении 220 В и частоте 50 Гц. При этом с помощью токоизмерительных клещей измерялась сила тока, протекающего через тестовую заготовку, а также температура посредством температурного датчика. За конец выпечки принимался момент времени, когда значение силы тока, протекающего через тестовую заготовку, не уменьшалось в течение 15 с.

Измерение энергетических затрат

На выпечку расходуется энергия, которую можно определить по следующей формуле:

$$W = U \int_0^t i dt, \quad (1)$$

где W – энергетические затраты (Дж); U – напряжение (В); i – сила тока (А); t – время выпечки (с).

По имеющимся экспериментальным данным зависимости изменения тока от времени была рассчитана площадь кривой, ограниченной осью времени и кривой изменения силы тока. Пределы интеграла – время от момента $t = 0$ до конца выпечки. Для точного подсчета кривая графика переносилась в файл чертежа САПР «Компас-3D», по точкам строился сплайн, после чего средствами программы производился расчет площади фигуры.

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

Размерность площади – Ахс. После умножения значения площади на значение напряжения, которое оставалось постоянным в ходе опыта, было получено значение энергетических затрат в Втхс; деление последней величины на массу готового хлеба и перевод Дж в МДж дает значение удельных энергозатрат в МДж/кг.

Основные результаты работы

1. Создание и апробация лабораторного образца установки для проведения ЭК-выпечки, выполнение конструкторской документации для изготовления (рис. 1).

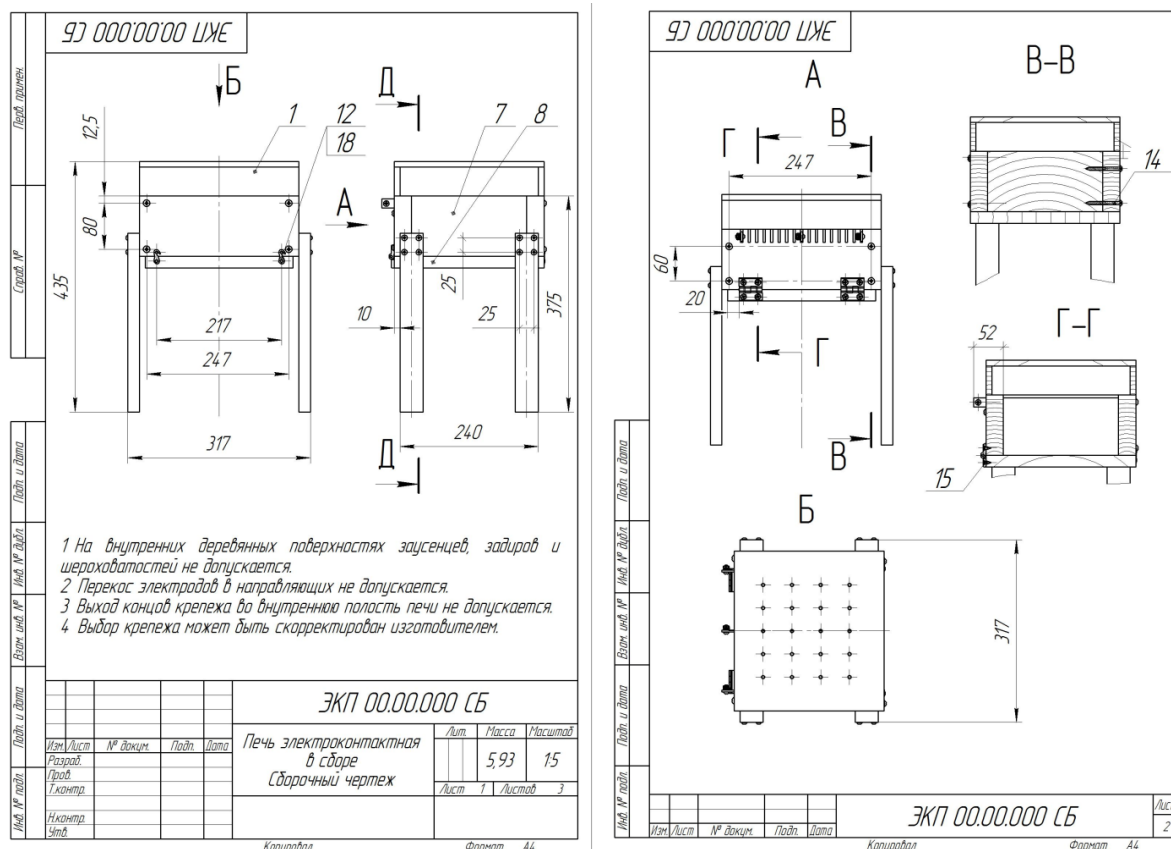


Рис. 1. Фрагмент конструкторской документации лабораторного образца

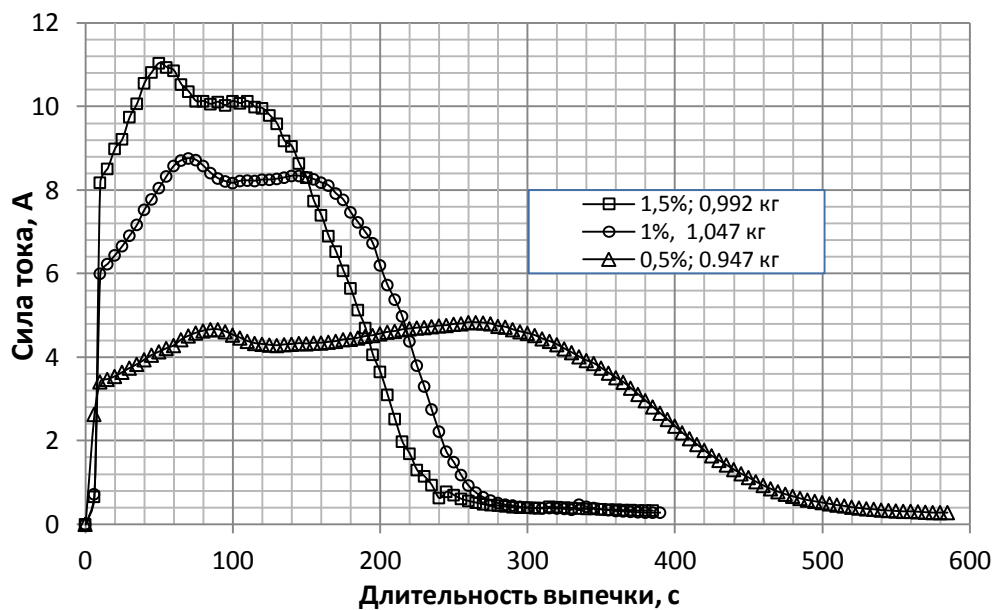
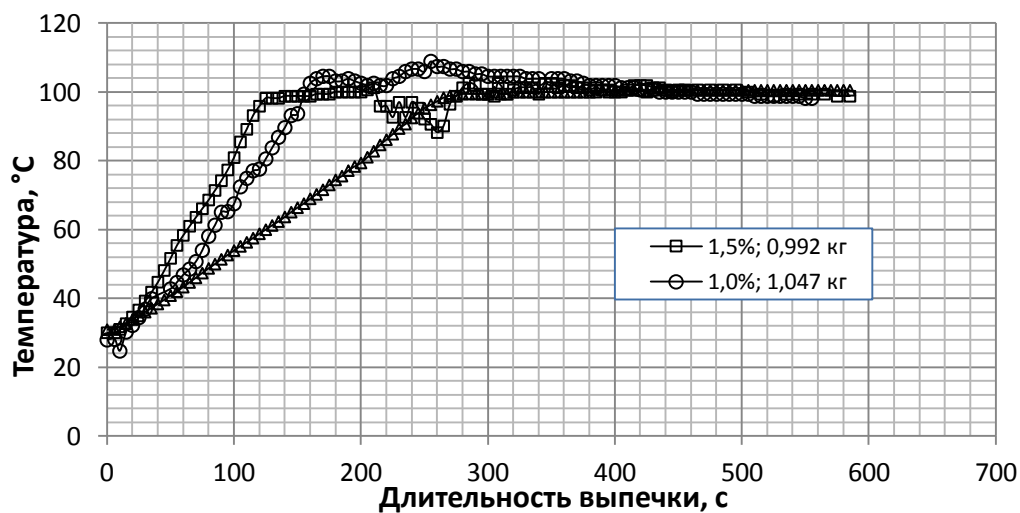
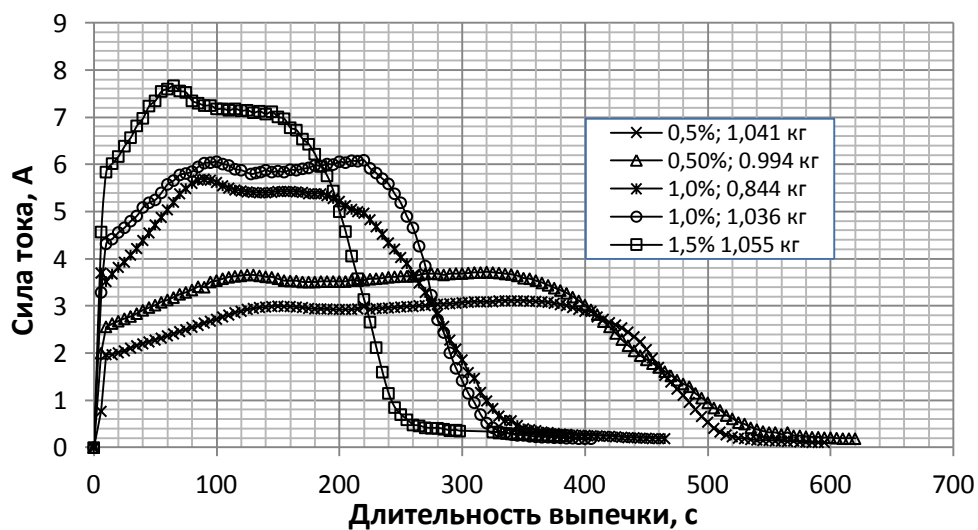
2. По результатам экспериментов получены кривые зависимостей тока и температуры в ходе выпечки от времени, а также данные по потреблению энергии на процесс выпечки.

Ниже приведены графики изменения силы тока (рис. 2) и температуры (рис. 3) для серии опытов с расстоянием между электродами 90 мм.

Кривые изменения силы тока и температуры от времени для межэлектродного расстояния в 101 мм приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

Как видно из графиков, концентрация соли напрямую влияет на длительность процесса и максимальный ток: чем она выше, тем больше ток и тем быстрее протекает выпечка. Различие в температурных зависимостях между опытами с разной концентрацией соли заключается в различной скорости нагрева теста. Здесь имеет место та же закономерность: при большей концентрации соли тесто нагревается быстрее.

Как видно из графиков, для межэлектродного расстояния в 101 мм наблюдается аналогичная тенденция. В диаграмму также включено два опыта с меньшей массой тестовых заготовок. Можно заметить, что уменьшение массы приводит к уменьшению максимального тока и длительности процесса. Предполагается, что для выпекания меньшей массы необходимо затратить меньше тепловой энергии. У таких заготовок меньший объем, меньше площадь контакта с электродами, что оказывает влияние на процесс выпечки.

Рис. 2. Кривые зависимости силы тока от времени для $L = 90$ ммРис. 3. Кривые зависимости температуры от времени для $L = 90$ ммРис. 4. Кривые зависимости силы тока от времени для $L = 101$ мм

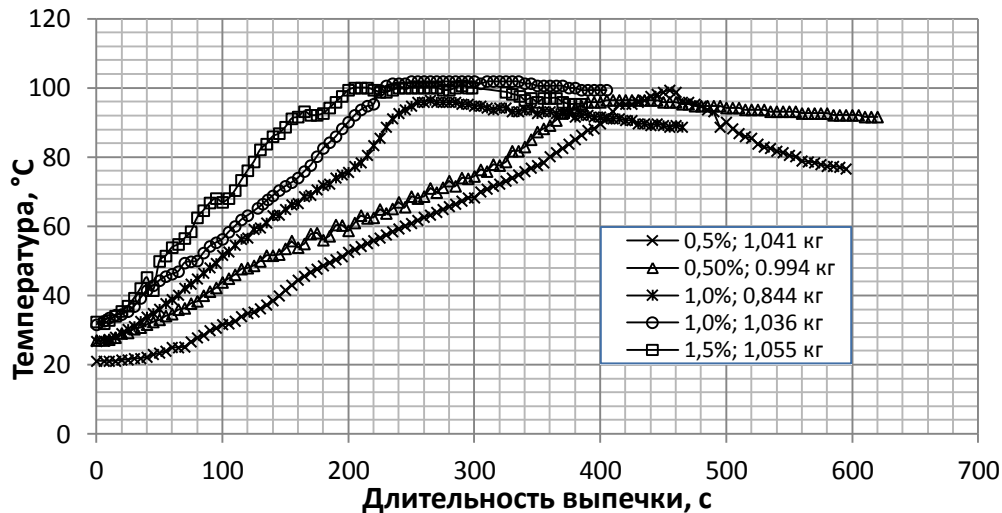


Рис. 5. Кривые зависимости температуры от времени для $L = 101$ мм.

Потребление энергии на процесс выпечки в конвективных печах было рассмотрено в работе [3], где приводится усредненное значение энергетических затрат в 3,67 МДж/кг.

Из данных, приведенных в Табл. 2 и в литературе, следует, что энергопотребление на выпечку ЭК-способом меньше, чем на выпечку конвективным способом, приблизительно в 8–13 раз. Также можно сделать предварительный вывод о том, что энергопотребление для выпечки при межэлектродном расстоянии в 90 мм в целом несколько больше, чем при 101 мм. Для более корректного сравнения требуется провести больше опытов. Также можно сделать предварительный вывод о том, что значительное уменьшение расстояния между электродами не приводит к снижению энергопотребления и длительности процесса выпечки.

Таблица 2

Данные по энергопотреблению на ЭК-выпечку

| Процент соли, % | Масса тестовых заготовок, кг | Межэлектродное расстояние, мм | Энергопотребление, МДж*ч/кг |
|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 0,5 | 0,950 | 90 | 0,414 |
| 1,0 | 1,047 | | 0,392 |
| 1,5 | 0,992 | | 0,418 |
| 0,5 | 1,041 | 101 | 0,277 |
| 0,5 | 0,994 | | 0,356 |
| 1,0 | 0,844 | | 0,385 |
| 1,0 | 1,036 | | 0,353 |
| 1,5 | 1,055 | | 0,328 |

Выводы

В работе проведено исследование процесса электроконтактной выпечки хлебобулочных изделий экспериментальным способом. Для осуществления проекта разработан лабораторный образец печи для проведения ЭК-выпечки. Разработан план эксперимента, выделены факторы варьирования, проведены эксперименты и выполнена обработка данных. Установлено, что концентрация соли напрямую связана с увеличением максимального значения силы тока и уменьшением длительности выпечки. Уменьшение межэлектродного расстояния не снижает энергетические затраты на выпечку. Затраты энергии на выпечку ЭК-способом примерно в 8–13 раз меньше, чем на выпечку в конвективных печах.

В дальнейшем планируется детальное исследование режимов для проведения расстойки, комплексные исследования изделий из разных видов сырья и с разными рецептурами. С целью разработки оптимальной конструкции печи будет осуществлен подбор материала электродов, проверена возможность автоматизации процесса выпечки, а также подготовлена конструкторская документация для изготовления ЭК-печи полупромышленного образца, который будет соответствовать параметрам безопасности, эргономичности и технологичности в изготовлении.

Публикации

1. Кулишов Б.А. и др. Перспективы применения электроконтактного способа выпечки хлеба // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 14–18.
2. Кулишов Б.А. и др. Применение электроконтактных технологий в пищевой промышленности // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск, 2017. С. 461–465.
3. Кулишов Б.А. и др. Разработка высокоэффективного оборудования для выпечки хлеба на основе электроконтактного нагрева // Научные проблемы военно-системных исследований. Сборник научных трудов. СПб., 2017. С. 95–106.
4. Кулишов Б.А. и др. Разработка экспериментальной установки для исследования процесса электроконтактной выпечки // VIII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»: материалы конференции. СПб., 2017. С. 311–313.
5. Кулишов Б.А., Новоселов А.Г. Анализ технологий производства декоративной панировочной крошки и разработка машинно-аппаратурной схемы // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 1. СПб., 2017. С. 162–165.
6. Кулишов Б.А., Новоселов А.Г. Исследование теплоотдачи с поверхности хлеба при ЭК-выпечке с использованием тепловизора [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: <https://openbooks.ifmo.ru/ru/file/6767/6767.pdf> (дата обращения: 10.10.18).

Литература

1. Курбонова М.К., Милюхина А.К. Обзор российского рынка хлеба и хлебобулочных изделий // Российская экономика в условиях современного кризиса: проблемы и пути выхода: сборник трудов конференции. Казань, 2016. С. 96–97.
2. Сидоренко Г.А. и др. Разработка технологии производства хлеба с применением электроконтактного способа выпечки: монография. Оренбург, 2012. – 124 с.
3. Le-bail A. et al. Energy demand for selected bread making processes: conventional versus part baked frozen technologies // Journal of Food Engineering. 2010. Vol. 96. No 4. P. 510–519.



Маковеева Анна Сергеевна
Факультет низкотемпературной энергетики
E-mail: makoveeva.anya@yandex.ru

УВЕЛИЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ НАЛИЧИИ В СОСТАВЕ РАБОЧЕГО ВЕЩЕСТВА КОРРОЗИОННО-АКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

А.С. Маковеева

Научный руководитель – доцент А.И. Прилуцкий

Исследование посвящено вопросу повышения надежности эксплуатации машин объемного действия (МОД) при наличии в рабочем веществе коррозионно-активных компонентов. Рассмотрены факторы, оказывающие существенное влияние на надежность работы МОД, в частности компрессоров, и решения, позволяющие уменьшить степень негативного воздействия коррозионно-активных компонентов в рабочем веществе на параметры МОД. Подтверждена адекватность математической модели и программы расчета «КОМДЕТ-М».

Широкое использование сжатых газов, газожидкостных и паровоздушных смесей с различным химическим составом и техническими параметрами во многих отраслях промышленности возможно благодаря применению компрессоров и детандеров. Поршневые компрессоры используются при необходимости создания различной степени сжатия рабочего вещества, для любых объемов производимого сжатого газа с произвольным начальным давлением, в том числе и для применения в качестве дожимного оборудования для сжатия любых, например взрывопожароопасных и агрессивных, сред. Таким образом, обеспечение надежности работы МОД является одной из первоочередных задач на каждом этапе жизненного цикла оборудования.

Основная цель научного исследования – изучение возможности повышения надежности эксплуатации МОД и разработка рекомендаций при условиях их работы с коррозионно-активными средами. Поставлена задача проведения комплекса исследований, направленных на изучение и анализ параметров работы поршневого дожимающего компрессора, рабочим веществом которого является взрывопожароопасный водородсодержащий газ при изменении в нем доли коррозионно-активной составляющей. Используемое при исследовании оборудование эксплуатируется в условиях действующего производства на одном из предприятий Ленинградской области.

В качестве объекта исследования выбрана первая ступень поршневого двухступенчатого дожимающего компрессора, работающего в составе установки каталитического риформинга, выполненного на четырехрядной оппозитной базе, сжимающего водородсодержащий газ (ВСГ).

Отличительной особенностью условий эксплуатации рассматриваемого оборудования является то, что в состав рабочего вещества компрессора входит хлор, который при наличии влаги в сжимаемой среде становится коррозионно-агрессивным, и выводы о характере работы компрессора и возможных его неисправностях необходимо делать с учетом данного обстоятельства [1]. При этом совпадение или отличие фактического состава рабочего вещества от заявленных в паспорте изделия невозможно установить без привлечения

к работе специалистов лаборатории нефтехимического предприятия, на котором эксплуатируется данный компрессор.

Ряд полученных анализов фактического состава рабочей смеси ВСГ-3 позволил сделать выводы, приведенные ниже. Паспортный ее состав представлен в Табл. 1.

Таблица 1

Химический состав рабочих веществ

| Компонент | μ_i , г/моль | Мольные доли | | |
|--|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | ВСГ-3 | ВСГ-2 | ВСГ-1 |
| Водород | 2,016 | 0,884 | 0,894 | 0,904 |
| CH ₄ (метан) | 16,042 | 0,041 | 0,041 | 0,041 |
| C ₂ H ₆ (этан) | 30,068 | 0,0316 | 0,0316 | 0,0316 |
| C ₂ H ₄ (этилен) | 28,054 | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| C ₃ H ₈ (пропан) | 44,094 | 0,0233 | 0,0233 | 0,0233 |
| C ₃ H ₆ (пропилен) | 15,703 | 0,0001 | 0,0001 | 0,0001 |
| Cl ₂ (хлор) | 70,906 | 0,02 | 0,01 | - |
| R, кДж/(кг·К) | | 1423,682 | 1614,077 | 1863,259 |
| <i>k</i> | | 1,328 | 1,329 | 1,33 |
| $\rho_{с.у.}$, кг/м ³ ($p=0,1013$ МПа, $T=293$ К) | | 0,240 | 0,211 | 0,183 |

Ступень компрессора укомплектована самодействующими восьмикольцевыми клапанами с посадочным диаметром 340 мм с высотой подъема неметаллических пластин 1,5 мм. Режим работы компрессора – круглосуточный, круглогодичный. Объемная производительность ступени составляет $V_{с.у.} = 220$ м³/мин, давление всасывания – $p_{вс} = 0,542$ МПа, давление нагнетания – $p_{нг} = 1,54$ МПа; температура газа на всасывании – $T_{вс} = 318$ К. Ступень укомплектована двумя цилиндрами диаметром $D_{ц} = 830$ мм с дисковыми поршнями, ход которых составляет $S_n = 390$ мм; частота оборотов коленчатого вала – $n = 333$ об/мин.

Поверочный расчет компрессора был выполнен с помощью программы «КОМДЕТ-М» версия 15.0.0.1, разработанной на кафедре криогенной техники и технологий сжиженного природного газа. Преимущества и возможности данной версии программы расчета МОД описаны в [2].

В Табл. 2 приведены результаты контрольного расчета первой ступени рассматриваемого компрессора, укомплектованной клапанами КТ340-2,5, при сжатии паспортной рабочей смеси ВСГ-3; геометрические параметры штатных клапанов КТ340-2,5 – в Табл. 3, а текущие характеристики работы ступени для рассматриваемого случая – на рис. 1.

По результатам расчета видно, что параметры работы ступени компрессора вполне удовлетворительны. При этом анализ действия клапанов КТ340-2,5 (рис. 1а) показал, что органы газораспределения отвечают условиям надежности, однако эффективность работы ступени несколько снижается за счет раннего их закрытия, которое наблюдается на первых двух пластинах всасывающих клапанов и на 1–5 пластинах нагнетательных.

С учетом ряда отрицательных отзывов обслуживающего компрессор персонала на надежность и долговечность безаварийной работы самодействующих клапанов, штоков и сальниковых уплотнений было сделано предположение, что на надежность действия узлов компрессора, в частности органов газораспределения и элементов кривошипно-шатунного механизма, также оказывает влияние состав рабочего вещества. Следует учитывать, что из-за наличия коррозионно-активного вещества – хлора в сжимаемом газе (Табл. 1), вероятность безаварийной работы машины может снижаться при попадании в рабочую среду влаги.

Таблица 2

Интегральные параметры работы первой ступени компрессора при сжатии ВСГ-3, ВСГ-2 и ВСГ-1 при комплектации клапанами КТ340-2,5

| Результаты контрольного расчета («КОМДЕТ-М») | | | | |
|---|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| Параметр | Размерность | ВСГ-3 | ВСГ-2 | ВСГ-1 |
| Массовый расход, m | кг/ч | 17598,857 | 15456,518 | 13472,066 |
| Объемная производительность, $V_{c,y}$ | стм ³ /мин | 1207,815 | 1202,676 | 1210,122 |
| Индикаторная мощность, $N_{инд}$ | кВт | 2829,653 | 2900,89 | 2799,768 |
| Номинальная мощность, $N_{ном}$ | | 2687,616 | 2682,643 | 2688,912 |
| Изотермический индикаторный КПД, $\eta_{из.инд}$ | - | 0,818 | 0,795 | 0,828 |
| Средняя температура нагнетания газа, $T_{нг.ср}^2$ | К | 421,34 | 421,16 | 420,31 |
| Потери энергии в клапанах, $\chi_{вс.кл}^1$ | % / кВт | 2,7/73,512 | 4,2/112,794 | 2,1/57,548 |
| Потери энергии в клапанах, $\chi_{нг.кл}$ | | 2,5/68,524 | 3,9/105,45 | 2,0/53,312 |
| Коэффициент подачи ступени, λ | - | 0,8862 | 0,8825 | 0,8881 |
| Скорость посадки пластин на седло, $v_{седло}^3$ вс.кл / нг.кл | м/с | 0,921/0,897 | 0,586/0,788 | 1,327/0,767 |
| Скорость посадки пластин на ограничитель, $v_{огран.}$ вс.кл / нг.кл | | 3,142/4,075 | 2,543/3,123 | 3,059/4,027 |
| Примечания: | | | | |
| ¹ Рекомендуемые суммарные потери от номинальной мощности составляют $\chi_{вс.кл} + \chi_{нг.кл} \leq 12\%$. | | | | |
| ² Температура нагнетания газа не должна превышать $T_{нг.ср} = 433$ К. | | | | |
| ³ Скорости посадки пластин на седло и ограничитель не должны превышать допустимых значений: $v_{седло} = 2-3$ м/с; $v_{огран.} = 5-8$ м/с. | | | | |

Таблица 3

Геометрические параметры клапанов

| Параметр клапана | КТ340-2,5 | КТ340-2,5М | КТ340-2,5М1 |
|--|---|------------|-------------|
| Толщина пластины, мм | 6 | | |
| Ширина пластины, мм | 10 | | |
| Плотность материала пластин, кг/м ³ | 1300 | | |
| Жесткость пружины, Н/м | 1444 | 704 | 1444 |
| Количество пластин | 8 | | |
| Средний диаметр пластин, мм первая–восьмая пластины | 80,0; 112,0; 144,0; 176,0; 208,0; 240,0; 272,0; 304,0 | | |
| Высота подъема пластин, мм | 1,5 | 1,5 | 1,0 |
| Количество пружин под первой–восьмой пластинами | 4; 4; 8; 8; 8; 8; 8; 8 | | |
| Предварительный натяг пружины, мм | 3,35 | 1,35 | 3,35 |
| Проход газа через пластины | двухсторонний | | |

По запросу обслуживающего персонала в адрес лаборатории последним был определен фактический состав рабочего вещества, который показал что, несмотря на его идентичность паспортным данным, газ не является осушенным до требуемого значения. Для оценки степени влияния хлора в ВСГ на параметры работы первой ступени компрессора был проведен численный эксперимент, при котором содержание хлора в рабочем веществе ВСГ-2 было теоретически снижено до 1 %. Состав газовой смеси ВСГ-2 приведен в Табл. 1.

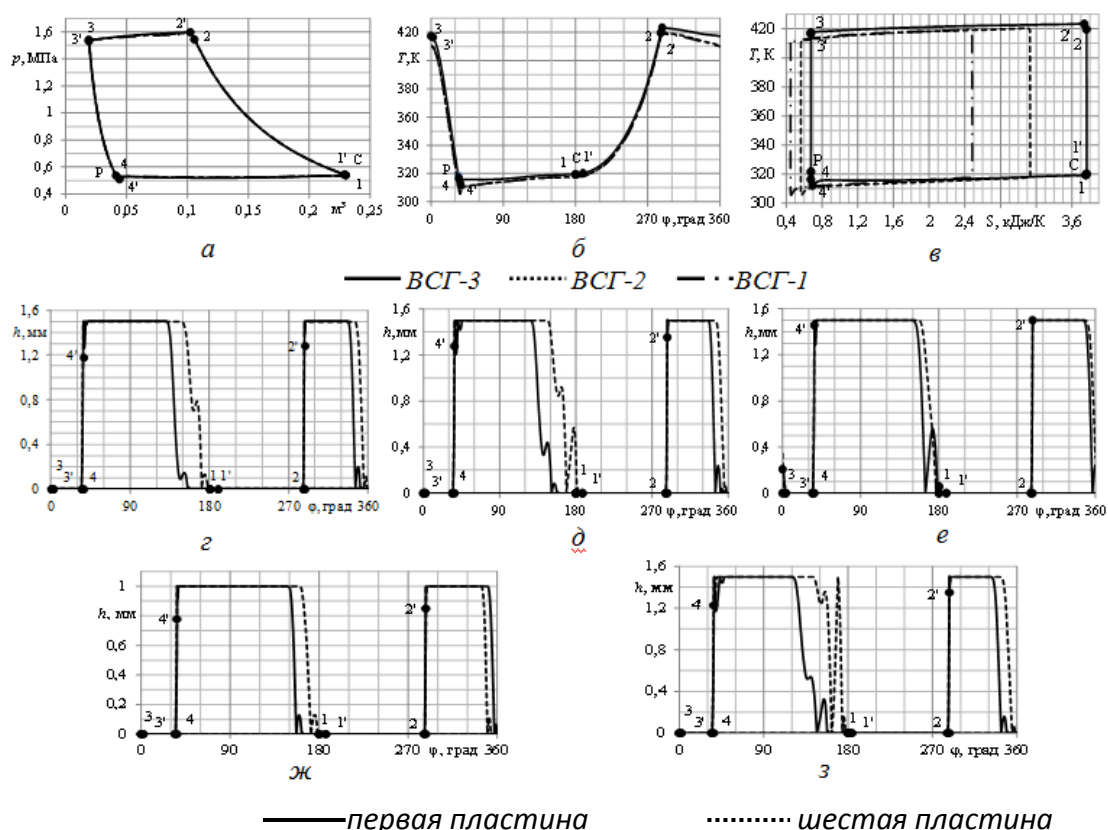


Рис. 1. Текущие параметры работы ступени компрессора:

а–в – при сжатии ВСГ-3, ВСГ-2, ВСГ-1 и комплектации цилиндров клапанами КТ340-2,5.

Динамика перемещения пластин всасывающих и нагнетательных клапанов:

г – КТ340-2,5 при сжатии ВСГ-3; д – КТ340-2,5 при сжатии ВСГ-2; е – КТ340-2,5М при сжатии ВСГ-2; ж – КТ340-2,5М1 при сжатии ВСГ-2; з – КТ340-2,5 при сжатии ВСГ-3

Зависимости, представленные на рис. 1(а–в) при сжатии ВСГ-2, демонстрируют незначительные изменения текущих параметров работы ступени компрессора относительно случая, рассмотренного ранее, когда в качестве рабочего вещества использовался ВСГ-1. Однако динамика перемещения пластин клапанов (рис. 1д) несколько ухудшилась, о чем свидетельствует наличие флаттера, также имеет место раннее закрытие всасывающих и нагнетательных клапанов. Интегральные параметры работы ступени изменились незначительно и находятся в пределах допустимых значений (Табл. 2).

Указанное обстоятельство может говорить о том, что в случае очистки рабочего вещества от хлора при сохранении влаги в газе возможен вариант, когда надежность и эффективность работы компрессора в целом не будет улучшена из-за возможного ухудшения динамики перемещения пластин всасывающих и нагнетательных клапанов.

Для выяснения целесообразности очистки рабочего вещества от хлора было принято решение о моделировании изменений в конструкции клапанов

Для улучшения показателей надежности работы органов газораспределения, учитывая наличие в смеси коррозионно-активного компонента – хлора, целесообразной модернизацией является изменение суммарной жесткости пружин клапанов. Так, при прочих идентичных ранее рассмотренному случаю параметрах работы ступени компрессора, динамика перемещения пластин (рис. 1е) и более своевременное их закрытие позволяют говорить о надежной и эффективной работе модернизированных клапанов КТ340-2,5М (Табл. 3).

Модернизация клапана КТ340-2,5М1 (Табл. 1), заключающаяся в уменьшения площади прохода в щели клапана $f_{щ}$ за счет снижения высоты подъема пластин h с 1,5 до 1 мм,

позволяет при удовлетворительных интегральных параметрах работы ступени говорить о повышении надежности работы органов газораспределения (рис. 1ж). Однако раннее закрытие на первых двух пластинах всасывающих и нагнетательных клапанов не обеспечивает повышение эффективности работы ступени.

Для получения более четкого представления о влиянии состава сжимаемого газа на параметры работы компрессора было проведено исследование, при котором рабочим веществом являлся ВСГ-1 без содержания коррозионно-активных соединений (Табл. 1). При этом первая ступень компрессора комплектуется штатными клапанами КТ340-2,5 (Табл. 3). Параметры работы рассматриваемой ступени компрессора при сжатии ВСГ-1 представлены в Табл. 2 и на рис. 1(а-в), 1з.

Из результатов расчета видно, что интегральные параметры работы ступени вполне удовлетворительны. Представленные на рис. 1(а-в) зависимости принципиально не отличаются от графиков, иллюстрирующих ранее рассмотренные случаи, в то время как динамика перемещения пластин клапанов ухудшилась (рис. 1з).

Таким образом, в рассмотренном случае не вполне удовлетворительная работа компрессора, выражавшаяся в эпизодических выходах из строя самодействующих клапанов, штоков и сальниковых уплотнений, определяется наличием влаги в коррозионно-активном ВСГ. Для обеспечения эффективного и надежного его функционирования следует не подвергать рабочее вещество очистке от хлора, так как в этом случае снижается его плотность, изменяется газовая постоянная и показатель адиабаты, вследствие чего значительно ухудшается динамика перемещения пластин клапанов, а приводит показатели сухости газа в соответствие требованиям технической документации.

В случае же очистки рабочего вещества от хлора для удовлетворительной работы компрессора требуется изменение конструкции самодействующих клапанов.

Публикации

1. *Маковеева А.С. и др.* Повышение возможностей программы КОМДЕТ-М путем ввода в нее в качестве рабочих веществ смесей произвольного состава [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <https://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3426/3426.pdf> (дата обращения: 02.07.18).
2. *Маковеева А.С., Прилуцкий А.И.* Выбор материального исполнения узлов и деталей машин объемного действия при их работе с коррозионно-активными рабочими веществами [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: <https://openbooks.ifmo.ru/ru/file/7996/7996.pdf> (дата обращения: 02.07.18).

Литература

1. *Маковеева А.С. и др.* Точность задания химического состава газовых смесей как условие корректности результатов расчета машин объемного действия // Компрессорная техника и пневматика. 2017. № 1. С. 35–38.
2. *Маковеева А.С. и др.* Алгоритм создания в программе КОМДЕТ-М рабочих веществ произвольного состава: учебное пособие. СПб., 2018. – 79 с.



Мельник Максим Владимирович
Факультет фотоники и оптоинформатики
E-mail: maxim.melnick@gmail.com

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ

М.В. Мельник

Научный руководитель – доцент А.Н. Цыпкин

В ходе работы проведен анализ соответствия терагерцовой временной последовательности субимпульсов и квазидискретного спектра, формируемого интерференцией двух фемтосекундных фазово-модулированных импульсов. Коэффициент несоответствия между этими структурами аналитически определен и экспериментально подтвержден. Показана возможность формирования последовательности субимпульсов любой продолжительности с терагерцовой частотой повторения и управления ею.

Основной целью проекта является анализ методов управления последовательностью фемтосекундных импульсов с терагерцовой частотой повторения.

Задачи проекта:

- аналитически обосновать несоответствие временной и спектральной структур, формируемых при интерференции двух фемтосекундных фазовомодулированных импульсов, сдвинутых на временную задержку, меньшую их длительности;
- методами численного моделирования доказать наличие коэффициента смещения центральной частоты субимпульсов в профилированной временной структуре относительно центральной частоты спектральных линий в профилированной спектральной структуре;
- экспериментально измерить временной сдвиг несоответствия временной структуры субимпульсов при модулировании спектральной профилированной структуры. Сравнить его с временным несоответствием, описанным аналитически;
- показать методами численного моделирования возможность формирования сверхдлинной последовательности субимпульсов с любой частотой следования и управления ею с учетом коэффициента несоответствия.

Один из методов формирования частотной гребенки и соответствующей ей временной последовательности описан в работах [1–3]. Он позволяет проводить профилирование импульса без использования специальных спектральных масок или модуляторов. При этом можно достичь частоты повторения импульсов более 10 ТГц, которая зависит от задержки между ними. Помимо этого, можно управлять такой последовательностью импульсов посредством спектрально-временного мультиплексирования [1]. Однако четкой корреляции между спектральной и временной структурами формируемой последовательности обнаружено не было.

В настоящей работе аналитически исследована и экспериментально подтверждена возможность управления последовательностью импульсов любой длительности с терагерцовой частотой следования, формируемой при интерференции двух фемтосекундных фазовомодулированных импульсов, сдвинутых на временную задержку.

Импульс, колебания электрического поля E которого имеют линейную фазовую модуляцию, может быть описан следующим уравнением:

$$E(t) = E_0 \times \exp\left(-2\frac{t^2}{\tau_0^2}\right) \sin\left(\omega_0\left(1 + \frac{\alpha_0}{\tau_0}t\right)t\right), \quad (1)$$

где E_0 – амплитуда импульса, ω_0 – центральная частота импульса τ_0 – длительность импульса, $\frac{\alpha_0}{\tau_0} = \alpha$ – коэффициент линейной фазовой модуляции.

Нетрудно показать, что при $\Delta\tau \ll \tau_0$ выражение для суперпозиции световых полей двух импульсов имеет следующий вид:

$$E = E_0 \times \exp\left(-2\frac{t^2}{\tau_0^2}\right) \times \left[2 \sin\left[(\omega_0 + \omega_{mod})t + \frac{\alpha_0}{\tau_0}\omega_0 t^2 + \varphi_0\right] \times \cos(\omega_{mod} + \varphi_0)\right], \quad (2)$$

где косинус отвечает за модуляцию сигнала, а синус – это его внутренняя структура.

В то же время, согласно теореме смещения Фурье, спектр такой интерференции может быть представлен в виде:

$$|G_s(\omega)|^2 = 2|G(\omega)|^2 \times [1 + \cos(2\pi\omega\Delta\tau)], \quad (3)$$

где:

$$G(\omega) = \frac{1}{2i} \sqrt{\frac{\pi}{\frac{2}{\tau_0^2} - i\omega_0 \frac{\alpha_0}{\tau_0}}} \times \exp\left(\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{4\left(\frac{2}{\tau_0^2} - i\omega_0 \frac{\alpha_0}{\tau_0}\right)}\right) - \frac{1}{2i} \sqrt{\frac{\pi}{\frac{2}{\tau_0^2} + i\omega_0 \frac{\alpha_0}{\tau_0}}} \times \exp\left(\frac{-(\omega + \omega_0)^2}{4\left(\frac{2}{\tau_0^2} + i\omega_0 \frac{\alpha_0}{\tau_0}\right)}\right). \quad (4)$$

На рис. 1а приведен пример результата интерференции фазомодулированного фемтосекундного импульса в спектральной области (3) с его копией, сдвинутой на временную задержку $\Delta\tau$. Здесь $\delta\omega$ – период квазидискретного спектра, $\Delta\omega$ – полуширина спектра, ω_0 – центральная частота, ω_i – частота i -го пика. Тогда $\frac{\Delta\omega}{\delta\omega} = N$ – количество пиков в квазидискретном спектре, а частоту i -го пика можно рассчитать как:

$$\omega_i = \omega_0 \pm i\delta\omega, \quad (5)$$

где $\delta\omega = \frac{1}{\Delta\tau}$.

На рис. 1б продемонстрирован пример амплитуды интерференционного сигнала фазомодулированного фемтосекундного импульса во временной области (2). Здесь $\delta\tau$ – период временных пиков, $\Delta\tau$ – временной сдвиг между двумя импульсами, а τ_0 – длительность одного импульса.

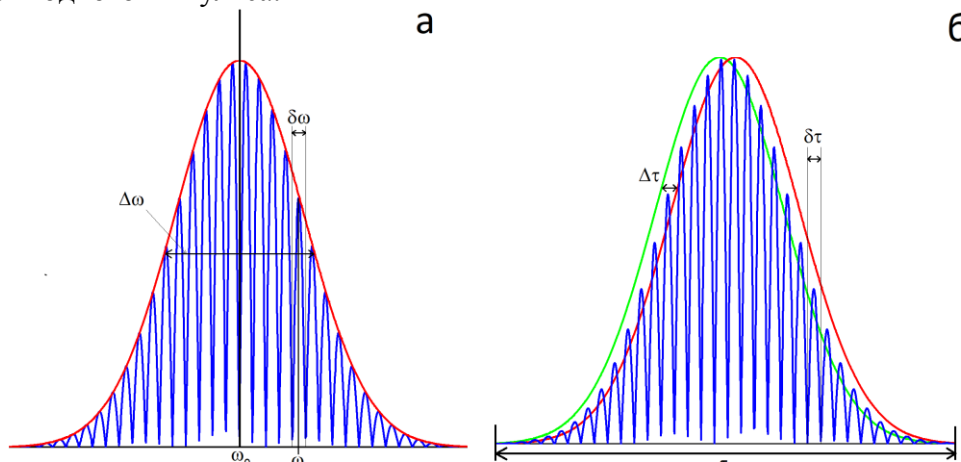


Рис. 1. Результат интерференции двух фазомодулированных фемтосекундных импульсов: в спектральной (а) и временной областях (б)

Для расчета частоты отдельного пика временной последовательности можно взять производную от фазы в уравнении (2):

$$\omega(t) = \left((\omega_0 + \omega_{mod})t + \frac{\alpha_0}{\tau_0} \omega_0 t^2 + \varphi_0 \right)' = \omega_0 + \omega_{mod} + 2 \frac{\alpha_0}{\tau_0} \omega_0 t.$$

Тогда $\omega_i = \omega_0 \pm \frac{i}{\delta\tau} \pm \omega_{\Delta\tau}$, где $\frac{1}{\delta\tau} = \omega_{mod}$, а $\omega_{\Delta\tau} = \omega(\Delta\tau) - \omega(0) = 2 \frac{\alpha_0}{\tau_0} \omega_0 \Delta\tau = 2\omega_{mod} = k$ – частотная надбавка, возникающая из-за отличия временной ширины результата интерференции двух импульсов, сдвинутых на временную задержку $\Delta\tau$, и временной ширины каждого импульса в отдельности. Следовательно, частоту i -го пика временной структуры для суммарного интерференционного поля при малых $\Delta\tau$ можно рассчитать по формуле:

$$\omega_i = \omega_0 \pm \omega_{mod}(i + 2). \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) видно, что центральные частоты i -х пиков в частотной и временной области отличаются на значение $2\omega_{mod}$, которое напрямую зависит от коэффициента фазовой модуляции α , временной задержки между импульсами $\Delta\tau$ и центральной частоты ω_0 .

Наличие этого дополнительного слагаемого приводит к несоответствию между интерференционными временными и спектральными структурами.

На рис. 2а приведены два фазовомодулированных импульса при $\tau_0 = 80$ фс и $\alpha_0 = 0,4$, рассчитанных по выражению (1) и сдвинутых на временную задержку $\Delta\tau = 10$ фс, а также результат их интерференции во временной и спектральной области рис. 2б и 2в соответственно.

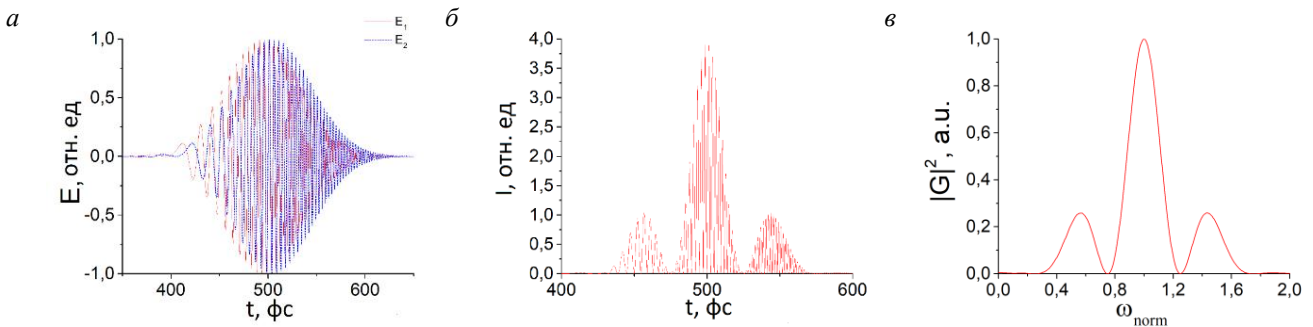


Рис. 2. Два фазовомодулированных импульса, сдвинутых на временную задержку

Полученный коэффициент смещения центральной частоты субимпульсов в профилированной временной структуре, равный $k = 2 \frac{\alpha_0}{\tau_0} \omega_0 \Delta\tau$, относительно центральной частоты спектральных линий в профилированной спектральной структуре может быть переведен во временное несоответствие между профилированными временной и спектральной структурами благодаря тому, что нам известен коэффициент линейной фазовой модуляции импульса. Исходя из этого, нетрудно показать, что:

$$k = \varphi(t_1 - t_2) = \alpha(t_1 - t_2). \quad (7)$$

Для случая, приведенного на рис. 2, $k = 0,1$, а значит, $t_1 - t_2 = \frac{k\tau_0}{\alpha_0} = 2\Delta\tau = 20$ фс. Для подтверждения полученных значений было проведено численное моделирование, результаты которого приведены на рис. 3. Видно, что сдвиг минимума после вырезания одного из пиков составляет около 20 фс, что соответствует вычисленному ранее значению.

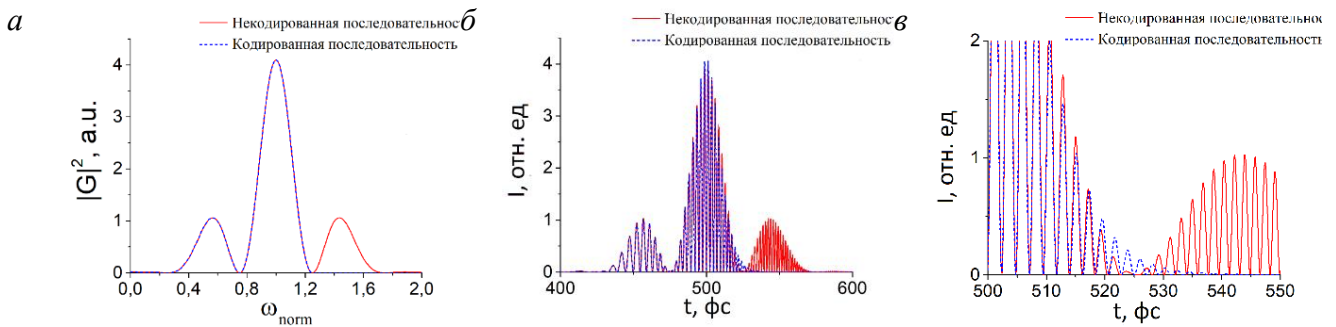


Рис. 3. Результат вырезания одного из пиков частотной области для $\Delta\tau = 10$ фс

Для проверки полученных результатов было проведено экспериментальное исследование по спектрально-временному кодированию фемтосекундной последовательности субимпульсов. Экспериментальная установка данного исследования представлена в статье [1]. В качестве источника использовалась фемтосекундная лазерная система на *Ti:Sapphire* на основе регенеративного усилителя (*Regulus 35f1k, Avesta-Project*). Длительность импульсов достигала 30 фс, частота их повторения – 1 кГц, а энергия одиночного импульса – 2 мДж. Последовательность импульсов формировалась в интерферометре Майкельсона при интерференции двух chirпированных импульсов с задержкой между импульсами, меньшей их длительности. Кодирование последовательности проходило с использованием шейпера путем модулирования спектральной квазидискретной структуры с помощью *SLM*, расположенного в его спектральной плоскости. Для визуализации полученного сигнала был использован временно-пространственный преобразователь.

На рис. 4 представлены результаты по кодированию временной последовательности путем вырезания спектральных компонентов (рис. 4а), а также результаты численного моделирования с такими же параметрами (рис. 4б, 4в). При вырезании спектральных линий происходит некорректное вырезание соответствующих субимпульсов во временной последовательности. Как видно из рис. 4а (вставка), смещение нуля произошло на 800 фс. Результаты численного моделирования показали аналогичное смещение в формируемой последовательности при кодировании во временной области, равное удвоенной временной задержке.

Таким образом, появляется возможность генерировать и управлять последовательностями с любой частотой следования с полученным допущением для chirпированного импульса любой длительности. На рис. 5 приведен пример численного моделирования управления последовательностью с частотой следования от 0,2 до 0,4 ТГц для chirпированного импульса длительностью 100 пс и коэффициентом фазовой модуляции 0,015. Частота следования изменялась путем изменения временной задержки между интерферирующими импульсами от 1,5 до 3 пс.

В результате кодирования информации для частоты следования 0,4 ТГц происходит искажение временной последовательности (рис. 5в-II), которое связано с тем, что временное смещение (7) для данного случая в 2,4 раза больше, чем длительность одного субимпульса.

Выводы

В данной работе аналитически обосновано несоответствие временной и спектральной структур, формируемых при интерференции двух фемтосекундных фазомодулированных импульсов, сдвинутых на временную задержку, меньшую их длительности. Определено и методами численного моделирования доказано наличие коэффициента смещения центральной частоты субимпульсов в профилированной временной структуре относительно центральной частоты спектральных линий в профилированной спектральной структуре. Используя полученный коэффициент смещения в спектральной области, аналитически было

определено временное несоответствие между профилированными временной и спектральными структурами.

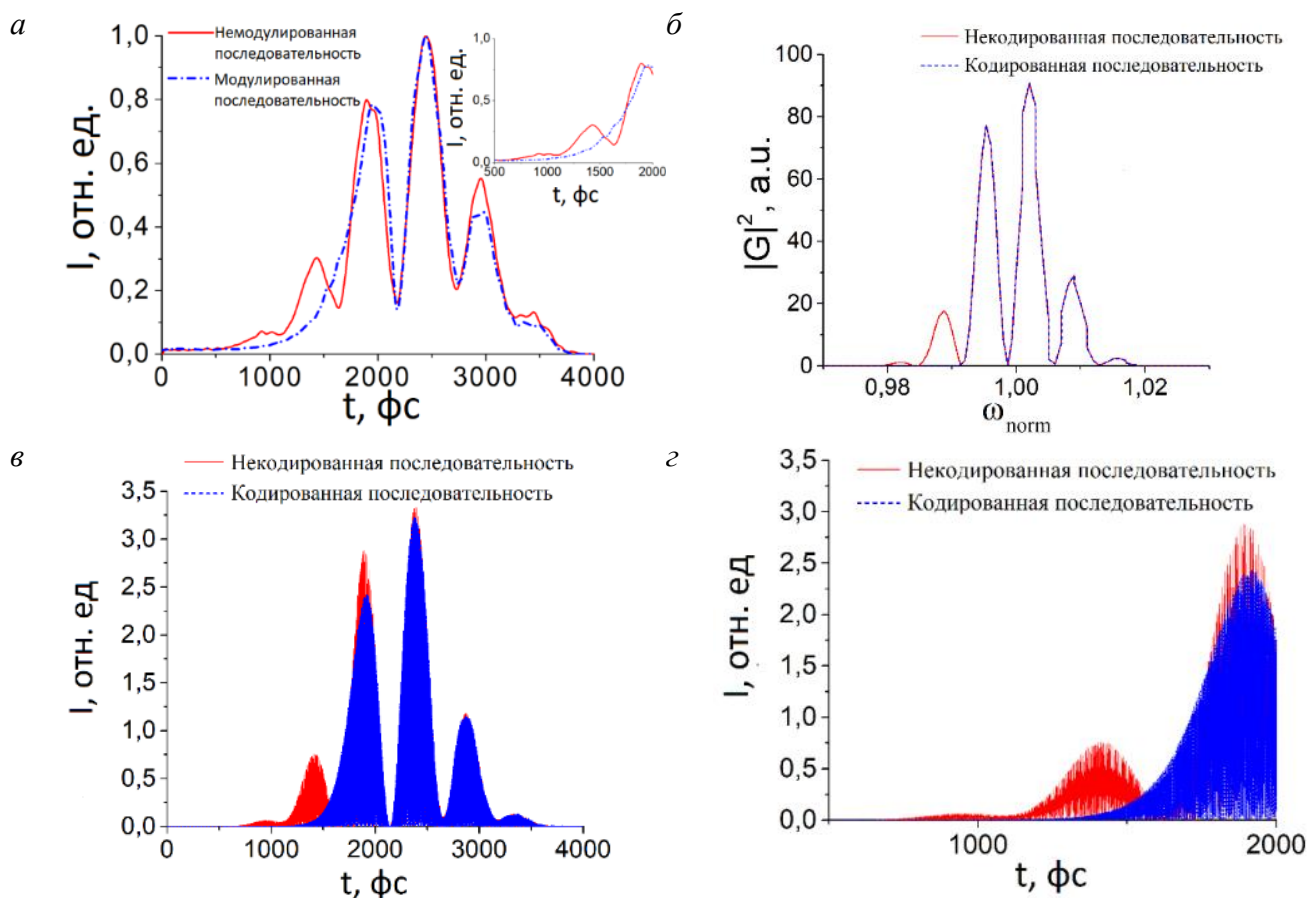


Рис. 4. а – результат эксперимента кодирования временной последовательности путем вырезания спектральных компонентов. Длительность импульса: 1200 фс, временная задержка: 400 фс. Вставка – результат несоответствия во временной области; б – формируемый (красная кривая) и кодированный (синяя кривая) квазидискретный спектр; в – результат моделирования кодирования временной последовательности. Красная кривая – исходная последовательность, синяя – кодированная. Длительность импульса: 1200 фс, временная задержка: 400 фс, коэффициент фазовой модуляции: 0,0085; г – результат несоответствия во временной области при моделировании кодирования

Экспериментально продемонстрирована возможность управления временной структурой путем вырезания «соответствующих» спектральных линий. В результате был экспериментально измерен временной сдвиг несоответствия временной структуры субимпульсов при модулировании спектральной профилированной структуры, который оказался равным временному несоответствию, описанному аналитически. В завершении с помощью методов численного моделирования продемонстрирована возможность формирования сверхдлинной последовательности субимпульсов с любой частотой следования и управления ею с учетом коэффициента несоответствия. Показано, что формирование управляемой последовательности длительностью более 100 пс труднодостижимо для существующих методов.

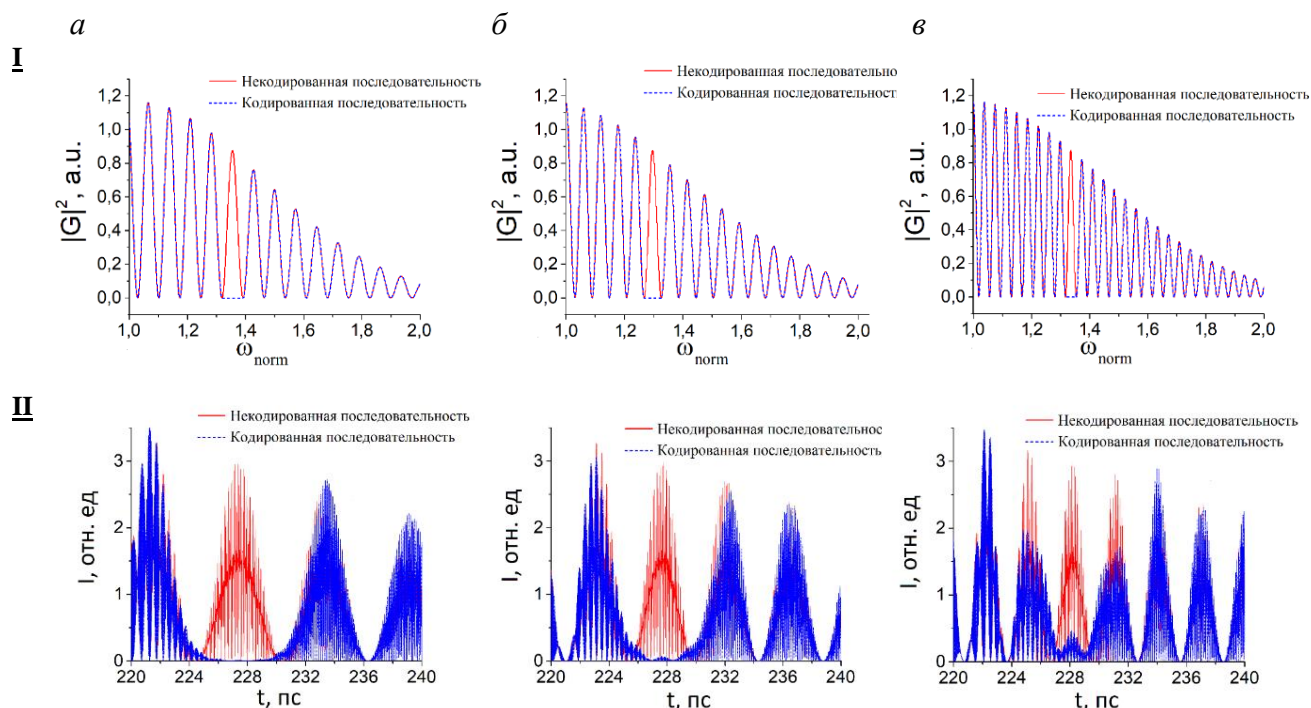


Рис. 5. Результат численного моделирования кодирования временной последовательности путем вырезания спектральных компонентов для импульса длительностью 100 пс, с частотой следования: а – 0,2 ТГц; б – 0,25 ТГц; в – 0,4 ТГц. Красные кривые – исходный квазидискретный спектр (I) и исходная последовательность субимпульсов (II), синие кривые – кодированные

Публикации

1. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Расчет времени когерентности фемтосекундного спектрального суперконтинуума в кварцевом оптическом волокне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13. № 3. С. 42–46.
2. Melnik M.V. et al. The transmission of 45 bits of information by a pair of interfering femtosecond pulses with superwide spectra // Journal of Optical Technology. 2013. Vol. 80. No 7. P. 466–469.
3. Melnik M.V., Tsyupkin A.N. The calculation of the coherence time of spectral supercontinuum at the output of the fused silica with different parameters of the initial pulse // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9200. P. 92000W.
4. Мельник М.В., Цыпкин А.Н. Численное моделирование процессов формирования когерентности спектрального суперконтинуума в средах с различной дисперсией групповых скоростей // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015». СПб., 2015. С. 168–170.
5. Мельник М.В. и др. Теоретический и экспериментальный анализ закономерностей зависимостей времени когерентности спектральных суперконтинуумов от центральной длины волны исходного импульса // Труды IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2016. СПб., 2016. С. 23–25.
6. Мельник М.В. и др. Теоретический анализ зависимости времени когерентности суперконтинуума от коэффициента фазовой модуляции // Сборник научных трудов VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2017. С. 167–168.
7. Melnik M.V. et al. Temporal coherence of optical supercontinuum // Romanian journal of physics. 2018. Vol. 63. No 3-4. P. 203.

Литература

1. *Tsyarkin A.N., Putilin S.E.* Spectral-temporal encoding and decoding of the femtosecond pulses sequences with a THz repetition rate // *Applied Physics B.* 2017. Vol. 123. No 1. P. 44.
2. *Tsyarkin A.N. et al.* Direct measurement of the parameters of a femtosecond pulse train with a THz repetition rate generated by the interference of two phase-modulated femtosecond pulses // *Applied Optics.* 2015. Vol. 54. No 8. P. 2113–2117.
3. *Tsyarkin A.N. et al.* Formation of a sequence of femtosecond optical pulses with a terahertz repetition rate // *Optics and Spectroscopy.* 2013. Vol. 114. No 6. P. 863–867.



Милюшин Александр Сергеевич
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: miljushin@rambler.ru

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОГО СЛЕЖЕНИЯ С УСКОРЕННОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СХОДИМОСТЬЮ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ КОНТРОЛЛЕРАХ

А.С. Милюшин

Научный руководитель – доцент Д.Н. Герасимов

В ходе исследования выполнен синтез алгоритмов адаптивного слежения с ускоренной параметрической сходимостью. Рассматриваются имеющиеся наработки в данной области, приведены решения, представленные автором в публикациях. Отмечена необходимость создания алгоритмов, обеспечивающих ускоренную сходимость с дальнейшей апробацией результатов на промышленных контроллерах.

Задача адаптивного слежения за различными неизвестными сигналами является одной из важнейших задач в теории автоматического управления. Несмотря на достаточно богатую историю исследований, в этой области до сих пор остается нерешенным целый ряд проблем. Так, разработанные алгоритмы зачастую подходят только для сравнительно узкого класса систем, кроме того, они нередко характеризуются слишком большим временем сходимости, что делает их применение на практике проблематичным. Подобные алгоритмы представлены, например в [2, 4].

Для современной промышленности решение задач адаптивного воспроизведения неизвестных сигналов, в частности тех, которые имеют мультисинусоидальную природу, имеет большое значение. Разрабатываемые в данном проекте методы могут быть востребованы в робототехнике, транспорте, сборочном производстве и других сферах. В качестве примера можно привести такие робототехнические системы, в которых ставится задача следования по заранее неизвестной траектории, посадка беспилотного аппарата на морскую платформу, колеблющуюся под действием волн. Более подробно области практического применения будут рассмотрены в соответствующем разделе данного проекта.

Непосредственной целью работы является использование теоретических результатов при создании программ, применимых для программирования промышленных контроллеров.

Общая постановка задачи

Рассматривается *MIMO*-объект (*Multiple input multiple output* – с англ. объект со многими входами и многими выходами), который описывается следующим образом:

$$y = W(p) [K_p u], \tag{1}$$

где $y \in \mathbb{R}^m$ – выход объекта управления, $u \in \mathbb{R}^m$ – вход объекта управления, $K_p \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – матрица с неизвестными высокочастотными коэффициентами, которая отражает характеристики объекта управления, $W(p)$ – передаточная матрица размерности $m \times m$ с неизвестными параметрами, но известным порядком, $p = d/dt$ – оператор дифференцирования.

Цель проекта – построение алгоритма управления, который бы обеспечил соблюдение следующего равенства:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - y_r(t)) = 0, \tag{2}$$

где $y_r \in \mathbb{R}^m$ – выход эталонной модели, заданной выражением:

$$y_r = W_r(p) [r], \tag{3}$$

где $W_r(p) = \text{diag} \{W_{ri}(p), i = \overline{1, m}\}$ – устойчивая диагональная матрица передаточных функций размерности $m \times m$, $r \in \mathbb{R}^m$ – кусочно-непрерывный, ограниченный эталонный вектор.

В рамках проекта был разработан новый алгоритм адаптивного управления, предполагающий использование нового закона управления:

$$u = \hat{K}_p^{-1} \hat{\Theta}^T \Phi, \tag{4}$$

где u – управление, \hat{K}_p – оценка высокочастотной матрицы $K_p \in \mathbb{R}^{m \times m}$ с неизвестными параметрами, описывающей свойства объекта управления. $\hat{\Theta} \in \mathbb{R}^{2m \times m}$ – матрица настраиваемых параметров, воспроизводимая с помощью алгоритма интегрального типа, $\Phi \in \mathbb{R}^{2m \times 1}$ – матрица измеряемых переменных (регрессор).

Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, изображены на рис. 1. В качестве выходного показателя представлена ошибка $\varepsilon = y(t) - y_r(t)$. Как видно, новые алгоритмы обеспечивают ускоренную по сравнению с предыдущими результатами сходимость ошибки по выходу.

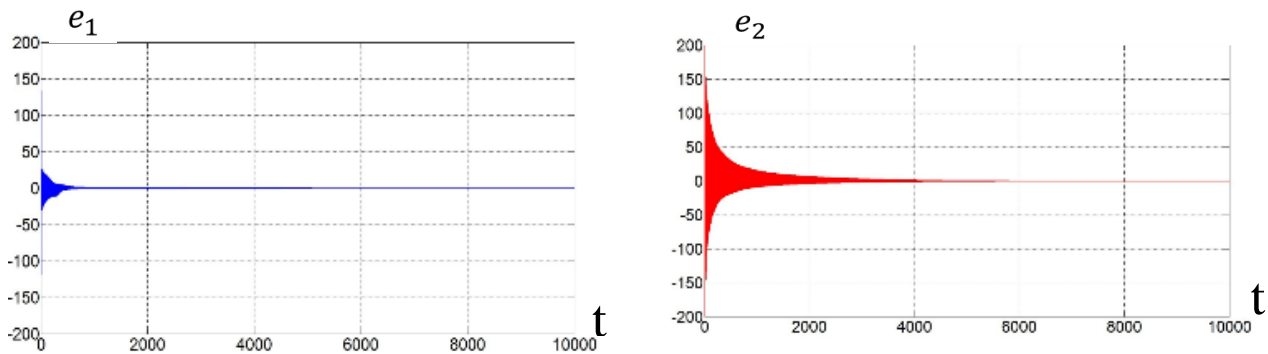


Рис. 1. Результаты моделирования в пакете Simulink, e_1, e_2 – ошибка по выходу: а – для начальных условий, близких к нулевым; б – для ненулевых начальных условий

Для решения задач проекта используются как общенаучные методы, так и те, которые, применяются в теории автоматического управления (ТАУ). К числу специфичных для ТАУ можно отнести следующие методы: модального [3, 4] и адаптивного управления [5], метод параметризации ошибки по выходу [1], расширенной ошибки [1], идентификации неизвестного мультисинусоидального сигнала [2], а также метод функции Ляпунова (для доказательства стабильности системы) [1, 2, 4].

Основным достигнутым результатом проекта является разработка алгоритмов адаптивного управления техническими системами, в частности с запаздываниями в каналах управления, удовлетворяющих следующим условиям:

- ограниченности внутренних сигналов системы;
- способности компенсировать запаздывания сигналов;
- параметрической сходимости сигналов системы.

Итогом теоретических исследований, проводившихся в рамках данного проекта, стали следующие результаты, подтвержденные выступлениями на конференциях:

- осуществлено воспроизведение мультисинусоидальных сигналов в *MIMO*-системах с задержками по входу;
- получено адаптивное воспроизведение неизвестных сигналов в неустойчивых линейных объектах с запаздыванием по входу;
- разработаны схемы адаптивного слежения выхода линейной системы за неизвестным сигналом с ускоренной параметрической сходимостью;
- предложено прямое адаптивное управление с ослаблением ограничений, накладываемых на матрицу высокочастотных коэффициентов (*MED'18*).

Применение результатов проекта целесообразно для построения алгоритмов, которые могут быть задействованы в ряде областей современной техники. Например:

- при движении колесного робота по заранее неизвестной траектории. В целях моделирования она может рассматриваться как кривая, состоящая из нескольких сегментов, каждый из которых описывается некоторой мультисинусоидальной функцией;
- для роботов, применяемых спасательными службами;
- для робототехнических систем, находящихся применение в геологоразведке и в различных видах экологического мониторинга;
- при разработке программ для автономного движения разминировующих роботов, что сократит стоимость и повысит безопасность работ;
- при посадке беспилотного летательного аппарата на плавучую платформу. В данном случае колебания платформы, вызванные волнением водной поверхности, могут быть представлены как неизвестный мультисинусоидальный сигнал. Колебания могут появляться также при движении платформы (судна). Данные аппараты могут быть полезны при проведении исследований на море, в частности в арктическом и антарктическом регионах Земли.

Решение описанной выше задачи для многоканального объекта позволит использовать результаты для мультиагентных систем, примером которой может служить система из нескольких летающих неуправляемых аппаратов, осуществляющих сбор информации о химическом составе окружающей среды, ее температуре и других показателях в местах труднодоступных для человека.

Использование методов, разрабатываемых в настоящем проекте, позволит уменьшить влияние человеческого фактора на управление такими аппаратами, что обусловлено физиологической ограниченностью скорости реакции человека. При этом повысится общий уровень безопасности функционирования систем, а в перспективе приведет к снижению их общей стоимости.

Публикации

1. *Милюшин А.С. и др.* Алгоритм адаптивного управления линейным объектом с произвольной относительной степенью // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 687–693.
2. *Miljushin A.S. et al.* MIMO direct adaptive control with relaxing constrains on high-frequency matrix gain assumption // 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Zadar, 2018. P. 535–540.

Литература

1. *Милюшин А.С. и др.* Алгоритм адаптивного управления линейным объектом с произвольной относительной степенью // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 9. С. 687–693.
2. *Халил Х.К.* Нелинейные системы. М., 2009. – 832 с.
3. *Bobtsov A.A., Borgul A.S.* Multiagent aerial vehicles system for ecological monitoring // IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). Berlin, 2013. P. 807–809.
4. *Miljushin A.S. et al.* MIMO direct adaptive control with relaxing constrains on high-frequency matrix gain assumption // 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Zadar, 2018. P. 535–540.
5. *Pyrkin A.A. et al.* Output adaptive controller for linear system with input delay and multisinusoidal disturbance // IEEE Conference on Control Applications (CCA). Antibes, France. P. 1777–1782.



Николаев Андрей Сергеевич
Факультет технологического менеджмента и инноваций
E-mail: nikand951@gmail.com

АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОСТРОЕНИЯ ПАТЕНТНЫХ ЛАНДШАФТОВ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА В СФЕРЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

А.С. Николаев

Научный руководитель – профессор Е.Л. Богданова

В работе были рассмотрены возможности применения результатов патентных исследований для принятия решений в сфере планирования и организации инновационной деятельности. Обоснована практическая значимость применения методики построения патентных ландшафтов при формировании или корректировке стратегических планов. Подходы к формированию патентных ландшафтов показаны на примере отечественного фармацевтического кластера.

Ускорение бизнес-процессов становится объективной характеристикой современной экономической системы. Высокий уровень неопределенности в экономике, связанный

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

с текущей напряженностью на внешнеполитической арене, препятствует развитию инвестиционных процессов. Современные компании вынуждены откладывать реализацию масштабных проектов из-за высоких рыночных рисков. Однако если компаниям удастся идентифицировать риск с максимальной точностью, то в стратегический план развития проекта можно включить меры по его минимизации. Таким образом, возникает необходимость в проведении глубокой аналитики по каждому из бизнес-процессов.

Наибольшее значение имеет оценка рисков, связанных с инновационной деятельностью, поскольку объектом анализа становится не только внутренняя устойчивость компании, но и факторы внешней среды, по которым необходимо проводить конкурентную разведку. Таким образом, приоритетным для изучения становится наиболее комплексный и достоверный источник данных об инновационной активности компаний, глобальных изобретательских трендах, занятых и свободных рыночных нишах [1]. Патентная информация является важным информационным источником, поскольку регистрация прав на объект интеллектуальной собственности позволяет компаниям ограничивать конкурентам поле для деятельности, следовательно, спланированная патентная стратегия позволяет достигать конкурентного преимущества и удерживать его в течение всего срока действия правоустанавливающего документа на объекты интеллектуальной собственности. Подобные тренды привели к формированию отдельного направления исследований, такого как патентная статистика.

Под патентной информацией понимаются сведения, хранящиеся в официальных государственных реестрах, о выданных патентах, поданных заявках на регистрацию патента, выбранных областях приоритетов, стратегиях охраны объектов интеллектуальных прав, а также об иных аспектах патентной защиты инновационных решений [2]. Исследуя данные о поданных заявках на получение патентов, уже выданных патентах, документах, утративших силу или иных правоустанавливающих документов на результаты интеллектуальной деятельности, мы получаем данные об авторах и правообладателях, областях приоритетов, стратегиях правовой охраны объектов интеллектуальной собственности – перспективных технологий и инновационных разработок.

Патентный анализ должен применяться на всех стадиях жизненного цикла инновационного проекта, так как позволяет в динамике оценить изменения рынка в ответ на новую инновационную политику. Наибольшее значение подобный анализ имеет для отраслей промышленности, испытывающих определенные трудности, в том числе за счет главенствования на внутреннем рынке иностранных товаров. Одной из таких уязвимых отраслей отечественной промышленности является фармацевтика. Производство лекарственных средств – один из способов обеспечения национальной безопасности государства, поэтому от успехов данной отрасли напрямую зависит устойчивое развитие страны.

Несмотря на активную реализацию различных государственных программ, фармацевтический рынок продолжает оставаться импортоориентированным, а основные лекарства, потребляемые населением, производятся за рубежом либо иностранными компаниями. Лидерами отечественного фармацевтического рынка остаются иностранные компании: «Sanofi Aventis», «Novartis», «Berlin-Chemie», «Takeda», «Bayer», «Teva». Один из инструментов обеспечения лидерства данных компаний – их патентная политика, направленная на максимальное покрытие мирового рынка. Отечественная фармацевтическая промышленность имеет статус «догоняющей» по отношению к мировым показателям в отрасли, поэтому вынуждена либо разрабатывать новые оригинальные лекарственные средства, либо производить дженерики – воспроизведенные лекарственные средства, зарегистрированные под собственной торговой маркой [3].

Проблемы отечественного фармацевтического кластера связаны с высокой степенью зависимости отечественных производителей от импортного сырья. Кроме того, отечественные фармацевтические компании не стремятся инвестировать в собственные

научно-исследовательские разработки для производства инновационных лекарственных средств, поскольку процесс создания препарата занимает продолжительный по экономическим меркам срок, требует серьезных инвестиционных вложений и обладает долгосрочной окупаемостью, связанной с необходимостью проведения клинических испытаний. Руководство компаний, добившись покрытия определенных рыночных ниш, не может расширять свое присутствие на рынке ввиду отсутствия комплексной информации о потребностях населения, глобальных трендах и свободных рыночных нишах, в которых появление инновационных разработок окажется рентабельным для инвестора и позволит достичь необходимого рыночного преимущества. Эти проблемы препятствуют развитию отечественной фармацевтической промышленности и создают дополнительные риски для инновационной активности.

Решением проблем развития отечественной фармацевтической отрасли является развитие государственных программ, подразумевающих разностороннюю поддержку деятельности компаний, производящих жизненно-важные лекарственные средства. В случае включения предприятия в программу импортозамещения по основным категориям лекарственных средств руководству компании может потребоваться проведение патентных исследований для обоснования своих планов развития. Однако результаты патентных исследований часто могут быть недостаточно репрезентативны для демонстрации их на собраниях акционеров или включения в аналитические отчеты, поскольку содержат достаточно большой объем информации в табличной форме. Решением этой проблемы является создание патентных ландшафтов. Это визуализация построенных логических взаимосвязей, которая упрощает понимание результатов проделанных вычислений, делая их наглядными для широкого круга пользователей.

Инструментарий патентного ландшафта основывается на принципах обработки больших данных, включая как компьютерную обработку, так и экспертные методы. Патентный ландшафт, или патентная карта, – средство визуализации патентной аналитической деятельности. Патентный ландшафт рекомендован Всемирной организацией интеллектуальной собственности как способ изучения и описания текущего положения дел в области патентования конкретной технологии в определенной стране и в определенном регионе. Однако возможно построение ландшафта и на глобальном уровне при наличии необходимых объемов данных. Исследование начинается с поиска патентной информации, охватывающей все аспекты деятельности в конкретной области – от технического уровня предприятий до определения отраслевых лидеров и обладателей наибольшего числа патентов в этой области, кроме того, оцениваются степени их актуальности, а также время окончания действия охранных документов на основании информации, заложенной в патентных базах данных. Затем собранные данные анализируются, и выносятся решения по вопросам, интересующим заказчика. В любом случае этот материал дает представление о том, кто и что делает в отрасли сейчас, а также что и как регистрируется. Патентный ландшафт систематизирует инновационные тренды, определяет круг решений для конкретных технических проблем [4].

Построение патентного ландшафта – это вид информационно-аналитической услуги, предоставляемый аналитическими агентствами и патентными ведомствами по запросу заказчика, исходя из поставленных задач [5]. Главный ресурс – данные, находящиеся в информационных системах патентных ведомств и базы данных патентной информации. Обработывая массивы больших данных на основании компьютерных алгоритмов, специалисты выявляют взаимосвязи и рассчитывают ряд показателей, характеризующих избранную предметную область [6].

Сегодня услуги по построению патентных ландшафтов предлагают различные консалтинговые компании, работающие, в том числе, на базе крупных инновационных центров. Метод построения ландшафта в таких случаях одинаковый: патентный поверенный

осуществляет патентный поиск в соответствии с поставленными задачами, а затем отдает полученные результаты на визуализацию. Визуализация патентного ландшафта, как правило, отдается на аутсорсинг в дизайн-бюро, которое исходит из стилистических пожеланий заказчика, следуя его брендбуку. Патентная аналитика и ландшафты входят в пакет услуг более пятидесяти зарубежных аудиторских компаний, среди которых «Cambridge IP», «Thomson Reuters», «Minesoft», «Patinformatics» и «Queste» [5]. Большинство отчетов государственных органов Европейского союза в сфере реализации программ стратегического развития базируются именно на технологии патентного ландшафта.

Для различных целей и пользователей существует множество типов патентных карт. Для демонстрации результатов статистического анализа можно использовать всевозможные графики и диаграммы. Все они будут формами выражения патентных карт. При необходимости определения точек соприкосновения интересов сравнивают патентные карты национального и зарубежного рынков.

Существуют программные продукты, осуществляющие построение ландшафтов под ключ, предлагающих яркую визуализацию данных в формате рейтингов, полигонов, пузырьковых или лепестковых диаграмм и т. д. В зависимости от назначения и функционала поисковых информационных систем они могут применяться как на некоторых этапах ландшафтного исследования, так и на всех сразу.

В качестве основных поисковых инструментов могут быть рассмотрены:

– бесплатные: *PATENTSCOPE* (ВОИС), «*Espacenet*» (Европейское патентное ведомство – ЕПВ), информационные системы национальных патентных ведомств в реферативном объеме, в том числе базы данных Федерального института промышленной собственности;

– коммерческие, ориентированные на построение патентных ландшафтов: «*Global Patent Index u PatStat*» (ЕПВ), «*Clarivate Innovation*» (компания «*Clarivate Analytics*»), «*Questel Orbit*» (компания «*Questel*»), «*PatBase*» (компания «*Minesoft*»), «*TotalPatent*» (компания «*LexisNexis*»), «*WIPS Global*» (Корея), «*PatSeer*» (компания «*Gridlogics*») и другие [5].

Существуют продукты, созданные непосредственно для отдельных этапов ландшафта. Например, для анализа данных – «*Clarivate Data Analyzer*», «*iNSIGHT Pro*», для анализа текста – «*Linguamatics*», для визуализации – «*Intellixir*», «*VantagePoint*» и прочие [7].

Процесс создания патентного ландшафта (патентное картирование) не может быть полностью автоматизирован, поскольку важна роль эксперта на этапе анализа полученных статистических совокупностей [8]. Несмотря на высокую степень автоматизации подбора данных, его результаты нуждаются в экспертной оценке. Кроме того, для построения достоверного патентного ландшафта необходимо использовать несколько баз патентных данных. Так как правовая охрана интеллектуальной собственности имеет выраженный региональный характер, а законодательство в этой области, несмотря на его унификацию, обладает разной степенью проработанности, то для патентного картирования укрупненного региона одной базы данных может быть недостаточно, поэтому необходимо использовать источники в разных странах мира. Универсальных баз патентных данных не существует, так как в условиях коммерческой ориентированности данной услуги объединение и обработка патентных данных из разных юрисдикций будет требовать значительных финансовых затрат, что сделает конечный продукт универсальным, но дорогостоящим. Рынок пока не готов к появлению глобальной базы патентных данных.

В сфере построения патентных ландшафтов для фармацевтической промышленности возможно создание двух вариантов ландшафтов: для оригинальных препаратов и для дженериков. В рамках исследования был выполнен патентный поиск, проведенный в интересах фармацевтических предприятий Северо-Западного Федерального округа на основе открытых патентных баз, также был выполнен анализ ценовых каталогов программ. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Построение патентных ландшафтов целесообразно для исследования рынка оригинальных препаратов.
2. Патентование дженериков возможно в части вспомогательных веществ, помогающих довести основной компонент лекарственного средства до места назначения в организме человека.
3. При патентовании дженериков возможно проведение патентного исследования с построением патентного ландшафта в маркетинговых целях, однако для выведения его на рынок построение ландшафта может быть избыточным.
4. Отчет о патентном ландшафте будет содержать в себе сведения об открытых патентных сегментах, что позволит существующим участникам рынка скорректировать собственную стратегию охраны результатов интеллектуальной собственности.
5. Использование отчета о патентном ландшафте возможно уполномоченными государственными органами для корректировки действующих стратегий поддержки отечественного фармацевтического кластера, а также в качестве источника информации для исследований в смежных отраслях промышленности.
6. Существующие программные продукты построения патентных ландшафтов обладают сходным функционалом, предлагая различия в части визуализации данных.
7. Использование специальных программных продуктов для построения патентных ландшафтов возможно только в крупных компаниях, которые проводят патентные исследования по широкому спектру вопросов, из-за высокой годовой стоимости обслуживания – около 200 тыс. руб.

Публикации

1. *Nikolaev A.S. et al.* Innovation management in the organization using patent analytics tools in the analysis of the competitive environment // Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference (IBIMA). Innovation Management and Education Excellence through Vision. Milan, 2018. P. 6856–6863.
2. *Николаев А.С.* Анализ бизнес-среды компании с помощью программных средств обработки патентной информации и построения патентных ландшафтов // Общество: политика, экономика, право. 2018. № 4. С. 37–40.
3. *Николаев А.С. и др.* Исследовательские университеты в структуре национальной инновационной экосистемы // Теория и практика общественного развития. 2018. № 8. С. 81–87.
4. *Nikolaev A.S. et al.* Philosophical foundations of the digital culture // Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference (IBIMA). Innovation Management and Education Excellence through Vision. Milan, 2018. P. 6668–6673.
5. *Николаев А.С. и др.* Модернизация образовательных программ по управлению интеллектуальной собственностью с учетом реалий цифровой экономики // Совершенствование учебно-методической работы в университете в условиях изменяющейся среды: сборник трудов II Национальной межвузовской научно-методической конференции. СПб., 2018. Т. 1. С. 117–122.
6. *Николаев А.С. и др.* Образование в области интеллектуальной собственности: статистика больших данных и патентные ландшафты // Статистика в цифровой экономике: обучение и использование: материалы Международной научно-практической конференции. СПб., 2018. С. 99–100.
7. *Николаев А.С.* Информационная и методологическая основа использования патентных данных при анализе конкурентной среды организации // Экономика, право, инновации. 2018. № 4 (1). С. 46–49.
8. *Николаев А.С.* Патентные ландшафты как инструмент повышения конкурентоспособности предприятия в цифровой экономике // Цифровая экономика в социально-экономическом развитии России. СПб., 2018. С. 209–213.

Литература

1. *Богданова Е.Л. и др.* Инновации и факторы как источники роста эффективности промышленного производства // Экономика и предпринимательство. 2016. № 4-2 (69). С. 86–90.
2. *Григорян М.Р.* Патентный анализ: стратегическое обоснование, применение, преимущества и ограничения [Электронный ресурс] // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. Т. 30. С. 341–345. URL: <https://e-koncept.ru/2015/65139.htm> (дата обращения: 14.11.2018).
3. *Насонова К.В.* Зависимые изобретения в фармацевтической области // Интеллектуальная собственность: теория и практика: сборник докладов научно-практической конференции «Петербургские коллегиальные чтения – 2016». СПб., 2016. С. 36–38.
4. *Trippе А.* Guidelines for preparing patent landscape reports. WIPO, 2015. – 131 p.
5. Методические рекомендации по подготовке отчетов о патентном обзоре (патентный ландшафт) // Приказ Роспатента от 23.01.2017 № 8 «Об утверждении Методических рекомендаций по подготовке отчетов о патентном обзоре (патентный ландшафт)». М., 2017. – 16 с.
6. *Streletskiy А. et al.* Patent landscape for nanotechnology // Foresight and STI Governance. 2015. Vol. 9. No 3. P. 40–53.
7. Interview with Matthew Luby: How to define a patent landscape [Electronic resource] // Intellogist. Patent search questions. Expert answer [Official website]. URL: <https://intellogist.wordpress.com/2011/08/23/interview-with-matthew-luby-how-to-define-a-patent-landscape> (accessed: 20.11.2018).
8. *Keiser N.H., Raciti E.P.* IP landscaping – creating a conceptual fabric of information [Electronic resource] // Intellectual Property Today. 2014. No 6. [Official website]. URL: <https://www.finnegan.com/en/insights/ip-landscaping-creating-a-conceptual-fabric-of-information.html> (accessed: 12.10.2018).



Нуждин Кирилл Андреевич
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: nkirill74@gmail.com

РАЗРАБОТКА РЕКУПЕРАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА НА ОСНОВЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

К.А. Нуждин

Научный руководитель – профессор В.М. Мусалимов

В данном проекте разработаны и исследованы рекуперационные механизмы на основе упругих элементов, а также проведены анализ и оценка моделей данных устройств. Внедрение упругих стержней (для механизмов поступательного действия) и пружин (для механизмов вращательного действия) позволило частично восстановить затраченную

механическую энергию посредством возникновения противодействующих сил, появляющихся при потере устойчивости упругого рабочего звена.

Цель проекта – разработка и исследование механизма, позволяющего частично восстанавливать (рекуперировать) затраченную механическую энергию посредством упругих свойств рабочих звеньев устройства, в качестве которых используются стержни прямоугольного сечения (для механизмов поступательного движения) и пружины (для механизмов вращательного движения). Работа этих звеньев основана на явлении потери устойчивости при приложении внешней вынуждающей силы.

В рамках данного проекта были решены следующие задачи:

– проведен патентный и литературный анализ существующих рекуперационных механизмов;

– создана рабочая модель предполагаемого механизма;

– выполнены анализ и проверка полученных результатов.

Проводилось исследование механизмов для вращательного и поступательного движений, однако главным образом рассматривался рекуперационный механизм для вращательного движения. Механизм для поступательного движения более детально исследовался в рамках другой работы, однако некоторые его общие свойства и характеристики следующие.

Рекуперационный механизм поступательного движения

Этот механизм представляет собой исполнительное устройство (актуатор, или движитель), в котором рабочее звено выполнено в виде упругого стержня прямоугольного сечения. Данное устройство предназначено для преобразования прикладываемого воздействия в поступательное движение посредством функционирования рабочего органа, чей принцип работы основан на явлении потери устойчивости (отклонение от прямого устойчивого положения) под действием нагружающей силы. Схема данного механизма изображена на рис. 1.

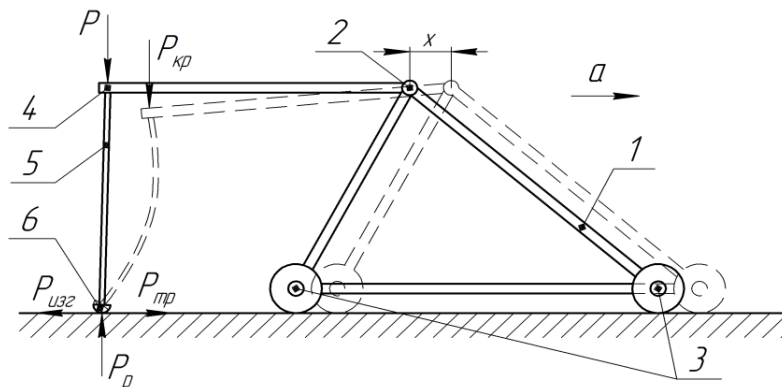


Рис. 1. Предполагаемая схема исполнительного устройства на основе упругого элемента:

1 – основание; 2 – шарнирный узел; 3 – подвижные опоры, оборудованные храповым механизмом; 4 – подвижное звено для передачи приложенной силы нагружения P (здесь указана только сила, возникающая в процессе действия молотка Маклакова); 5 – упругий элемент; 6 – полусферический опорный наконечник; $P_{кр}$ – критическая сила нагружения; $P_{тр}$ – сила трения; $P_{изг}$ – изгибающая сила; P_p – сила реакции опоры; x – смещение движителя

Принцип работы предложенного механизма заключается в следующем: в начальный момент времени в области сопряжения подвижного звена для передачи силы нагружения (4) и упругого элемента (5) прикладывается сила P , направленная вертикально вниз (рис. 1). При достижении данной силой критического значения происходит потеря устойчивости упругого

элемента, то есть под действием появившегося изгибающего момента изменяется его прямолинейная форма. Благодаря данному явлению свободный конец упругого элемента (в представленном варианте в качестве такового рассматривается нижний край упругого элемента с полукруглым опорным наконечником) начнет отклоняться от прямолинейного устойчивого состояния. Однако при условии возникновения силы трения $P_{тр}$, направленной противоположно изгибающей силе $P_{изг}$, вся внутренняя энергия упругого элемента перераспределится и поменяет направление на противоположное, сонаправленное с поступательным движением актуатора. При снятии приложенной силы P произойдет обратный процесс и упругий элемент примет первоначальную прямолинейную форму, однако подвижное основание (как и весь механизм в целом) не изменит своего положения благодаря храповым механизмам подвижных опор [1].

Рекуперационный механизм вращательного движения

Данный механизм представляет собой рабочее поворотное звено с пружинным аккумулятором. Схема устройства представлена на рис. 2 [2, 3].

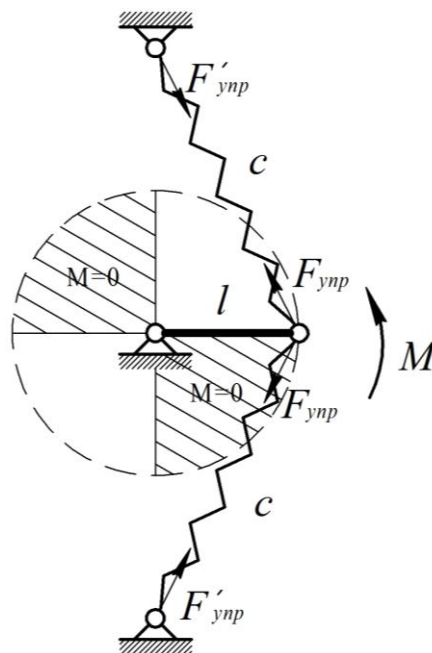


Рис. 2. Схема работы пружинного аккумулятора с рабочим поворотным звеном

Весь рабочий цикл поворота механизма, то есть полный оборот исполнительного звена вокруг оси вращения, можно мысленно разделить на четыре части (рис. 2).

Незаштрихованные области соответствуют стадии зарядки пружинного аккумулятора, здесь под действием крутящего момента привода совершается вращательное движение рабочего звена, которое, в свою очередь, воздействуя на пружины, выводит их из состояния равновесия, сжимая одну и растягивая другую. Следует сделать некоторое пояснение: согласно теории катастроф и теории устойчивости, данный механизм с пружинным аккумулятором, состоящим из двух одинаковых пружин, имеет два положения устойчивости, то есть такие условия, при которых не совершаются колебания рабочего звена, а состояние и положение пружин не меняются сколь угодно долго. В нашем случае в начальный момент времени механизм находится в первом устойчивом состоянии, равном нулевому отклонению рабочего звена относительно оси вращения. Второе устойчивое положение симметрично ему и расположено в точке отклонения исполнительного звена, равного 180° . Данные два положения являются своего рода аттракторами для правой и левой полуокружностей траектории движения рабочего звена.

Заштрихованные области графика траектории исполнительного звена соответствуют циклу работы пружинного аккумулятора. Здесь происходит отключение привода, и движение производится только за счет накопленной энергии пружин.

Моделирование рекуперационного механизма вращательного движения

Модель устройства, выполненная с использованием библиотеки *SimMechanics* в среде *MATLAB/Simulink*, представлена на рис. 3.

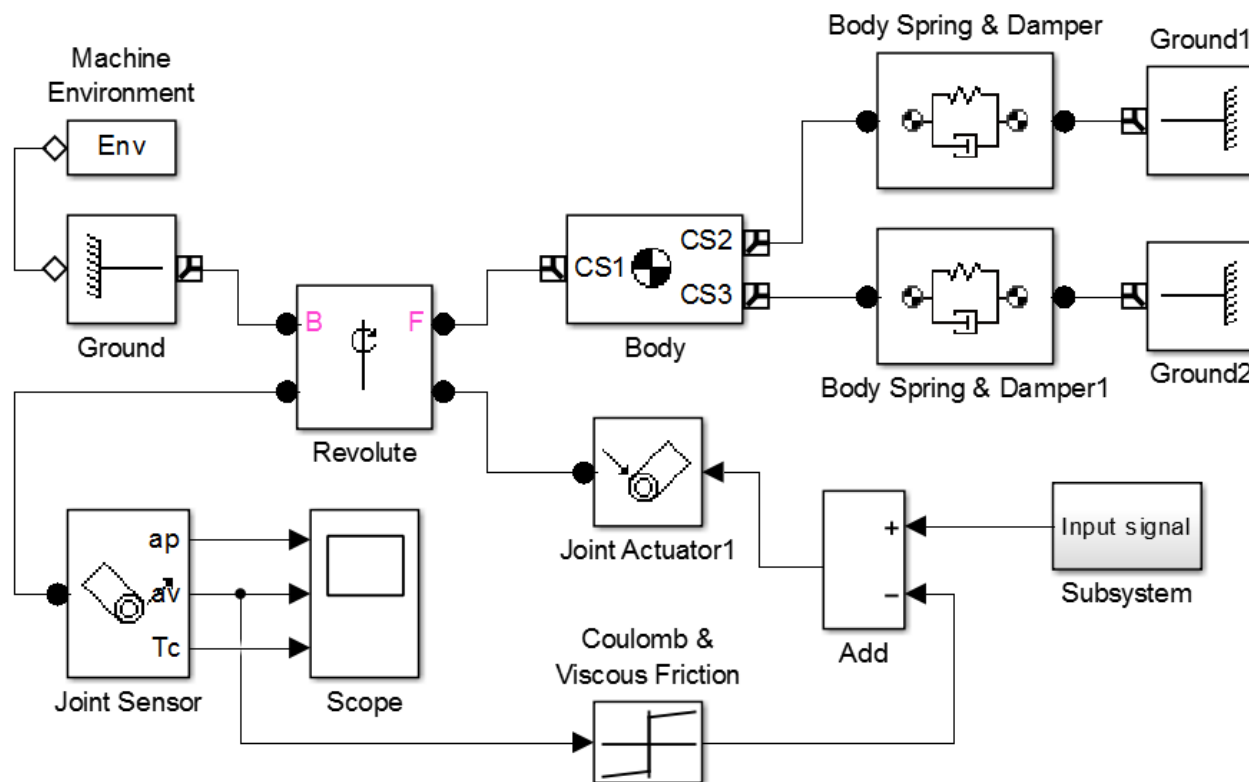


Рис. 3. Модель механизма вращательного движения с рекуперацией энергии

Блоки *Machine Environment* и *Ground* (1, 2) задают соответственно гравитационные силы для модели и условия крепления и положения частей механизма. *Revolute*, *Body* – формируют геометрию вращающегося рабочего звена. *Joint Actuator1* является кинематическим приводом, обеспечивающим вращательное движение. *Joint Sensor* предназначен для получения выходных характеристик рабочего (исполнительного) звена. Блок *Coulomb & Viscous Friction* используется для учета влияния трения в шарнирном соединении *Revolute*. *Body Spring & Damper* (1) выполняют роли нелинейных пружин. Блок *Subsystem* задает входной сигнал, подаваемый на привод *Joint Actuator1*.

Модель построена таким образом, что ось вращения рабочего звена лежит на одной прямой с осями вращения шарнирного сочленения пружин и стойки. Исходная длина этих пружин принимается равной расстоянию от оси вращения рабочего звена до точки крепления пружин к основанию. Кроме этого, в процессе функционирования механизма каждая из них находится в деформированном (растянутом) состоянии и достигает исходной (начальной) длины лишь в тот момент времени, когда другая пружина имеет наибольшую величину растяжения, что позволяет наиболее эффективно применять пружинный аккумулятор для рекуперации энергии, затраченной приводом вращательного движения.

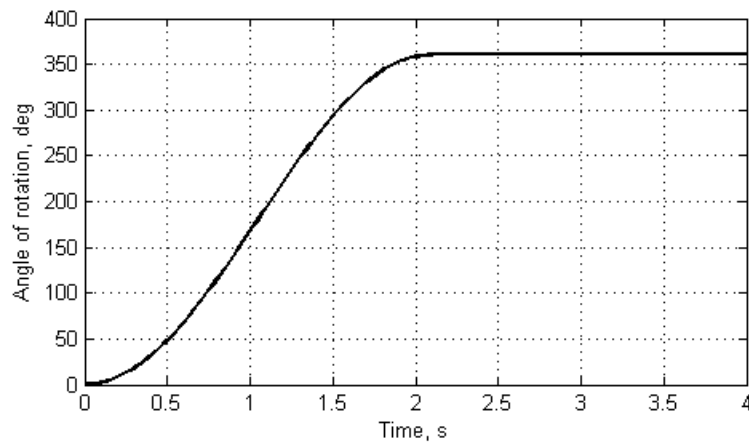


Рис. 4. График зависимости вращения вала привода от времени

Для оценки рекуперационных свойств полученного механизма было проведено сравнение его характеристик с исходным устройством без пружинного аккумулятора. Для этого на вход блока привода подавался один и тот же сигнал, соответствующий одному полному обороту исполнительного звена (рис. 4).

На рис. 5 приведены результаты, полученные для данных механизмов. Слева – характеристики (угол поворота исполнительного звена, град.; угловая скорость вращения, град./с; крутящий момент привода, Н*м) исходного механизма, справа – те же характеристики для рекуперационного механизма с пружинным аккумулятором.

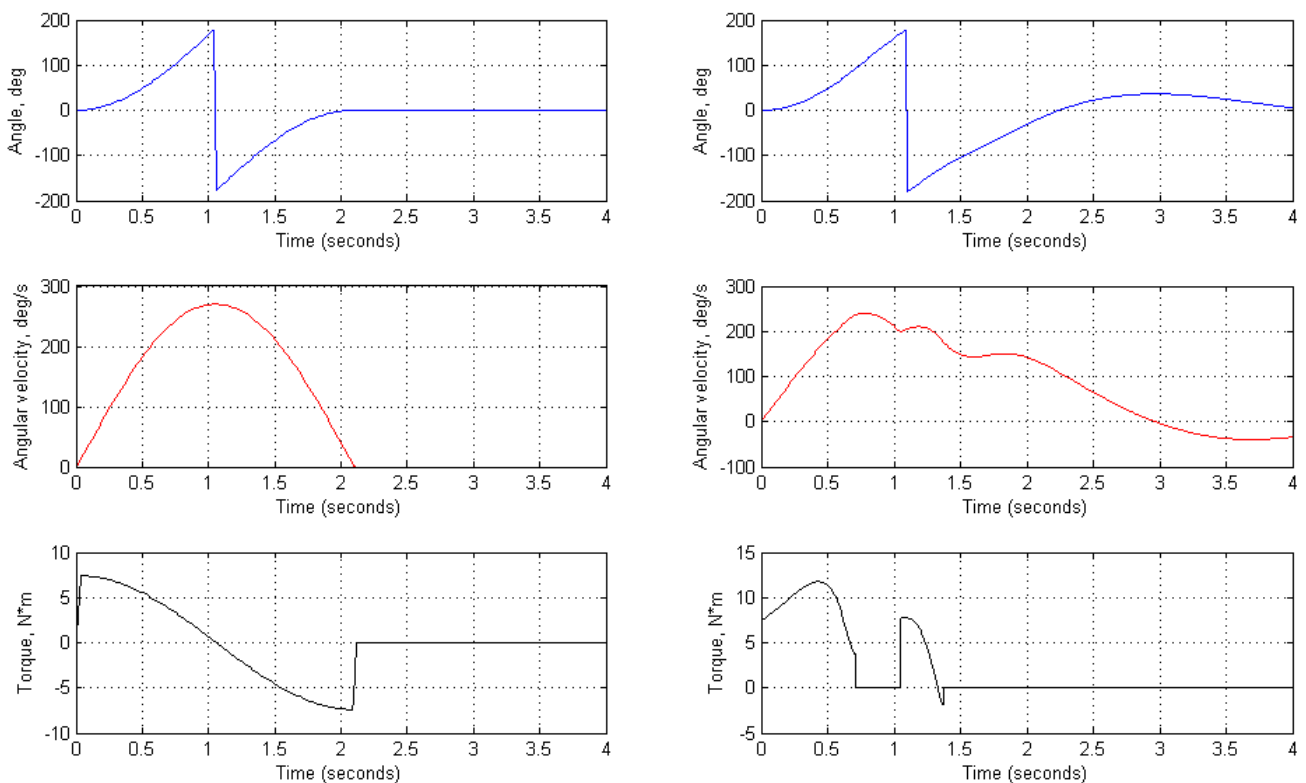


Рис. 5. Результаты, полученные для исходного механизма (слева) и механизма с пружинным аккумулятором (справа)

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что применение пружинного аккумулятора позволяет значительно уменьшить время работы привода, что приводит к уменьшению энергопотребления в среднем на 21%. Однако, с другой стороны, использование упругих элементов повышает частоту колебаний рабочего звена, тем самым увеличивая время выполнения рабочего цикла.

При выполнении исследования были достигнуты следующие результаты:

- проведены патентный и литературный обзоры существующих аналогов разрабатываемого устройства, анализ их достоинств и недостатков;
- создана модель, разработана конструкторская и технологическая документации предполагаемого устройства;
- проведены испытания для проверки и подтверждения заявленных технических характеристик полученного изделия в соответствии с требованиями государственных стандартов.

Разработанное устройство может найти применение при проектировании различных подвижных узлов машин и механизмов, целью которых является преобразование приложенной силы в поступательное или вращательное движения исполнительного звена. Полученное изделие также можно использовать в области робототехники в качестве нового вида энергоэффективных движителей, а его конструкцию, как наглядное пособие для изучения упругих свойств звеньев механизма. Исследование состояния равновесия и определения сил, возникающих в процессе потери устойчивости упругого звена механизма под действием внешней силы, может быть полезно для студентов, обучающихся по направлению подготовки 221000 «Мехатроника и робототехника», а также для изучающих курсы «Теория механизмов и машин» и «Проектирование мехатронных устройств».

Публикации

1. *Нуждин К.А.* Проблемы создания актуаторов на основе упругих элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 2. С. 148–153.
2. *Нуждин К.А., Аканиси М.* Исследование волновых уравнений упругого элемента [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/7671/7671.pdf> (дата обращения: 10.09.2018).
3. *Нуждин К.А.* Моделирование и исследование динамики рекуперационных механизмов [Электронный ресурс] // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ – 2018». Электронное издание. М., 2018. URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2018/data/section_20_13567.htm (дата обращения: 10.09.2018).
4. *Nuzhdin K.A.* Recuperation mechanisms based on elastic elements // Proceedings of the 17th International Symposium Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering. Tallinn, 2018. P. 268–271.
5. *Nuzhdin K.A., Musalimov V.M.* Investigation and development of an actuator based on an elastic element // XLVI International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics”. Proceedings. Saint Petersburg, 2018. P. 191–202.

Литература

1. *Нуждин К.А.* Проблемы создания актуаторов на основе упругих элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 2. С. 148–153.
2. *Пелупесси Д.С., Жавнер М.В.* Пружинные аккумуляторы с выходным поворотным звеном // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1-2. С. 256–259.
3. *Александров А.В., Потапов В.Д.* Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. вузов. М., 1990. – 400 с.



Пантюхин Игорь Сергеевич
Факультет инфокоммуникационных технологий
E-mail: zevall@ya.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОСТИНЦИДЕНТНОГО ВНУТРЕННЕГО АУДИТА СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

И.С. Пантюхин

Научный руководитель – профессор И.А. Зикратов

С увеличением объема данных и средств вычислительной техники количество инцидентов информационной безопасности растет. Большинство из возникающих в процессе эксплуатации вычислительной техники инцидентов остается неисследованным. Причина этого кроется в отсутствии современных методов и подходов комплексного внутреннего аудита, отвечающих современным требованиям развития техники. В связи с этим становятся актуальными задачи разработки методов, способов и подходов, которые бы позволяли снизить временные затраты внутреннего аудита и вероятность ошибки анализа данных, повысить информативность инцидента информационной безопасности и повысить точность идентификации средств вычислительной техники.

Получение данных для криминалистического анализа может быть затруднительным [1] ввиду специфических особенностей каждой информационной системы. Приходится применять различные подходы, которые позволяют извлечь максимальное количество сырых данных для последующего анализа на предмет наличия в них цифровых улик. Эти системы могут работать как на аппаратном обеспечении, так и на программном. Свои трудности в доступе к данным имеются и там, и там.

Важнейшим критерием при получении данных для криминалистического анализа является отсутствие изменений. При этом допускается частичная их коррекция, не влияющая на результат исследования или сбор доказательной базы в целом, но позволяющая извлечь максимальное количество данных для криминалистического анализа в конкретный момент времени.

При использовании энергонезависимых носителей информации (жестких дисков и флеш-носителей) возможна утеря значимых данных, которые находятся в энергозависимой памяти (оперативной) или дампе сети (сетевом трафике). Анализ в совокупности трех компонентов: дампов жесткого диска, оперативной памяти и трафика сети – может повысить информативность выявленных деталей инцидента, что позволит составить более обширную доказательную базу для дальнейшего расследования [2–4].

Отличительной особенностью предлагаемого решения является то, что постинцидентный внутренний аудит средств вычислительной техники основывается на возможности комплексного анализа дампов сети [5], жесткого диска и оперативной памяти. При построении взаимосвязей между атрибутами объектов с применением поисковых алгоритмов инцидент информационной безопасности может расследовать менее квалифицированный персонал, кроме того, это позволяет снизить временные затраты и вероятность потери цифровых улик.

Цель проекта – обеспечение проведения криминалистического анализа средств вычислительной техники на наличие в дампах информации о компьютерных инцидентах.

Задача проекта – исследование и разработка системы проведения постинцидентного внутреннего аудита средств вычислительной техники на основе анализа дампов сетевого трафика, жесткого диска и оперативной памяти.

Способ решения задачи

Предлагаемый способ поиска цифровых уликов на основе комплексного анализа дампов жесткого диска, оперативной памяти и сети имеет значительные преимущества по сравнению с существующими способами и средствами решения поставленной задачи.

Технологический процесс состоит из нескольких последовательных шагов. В первую очередь осуществляется процесс получения и формирования данных, которые хранятся в дампах жесткого диска (*HDD*), оперативной памяти (*RAM*) и сети (*NET*). Далее они разбираются программными средствами [6] на составляющие, набор которых имеет большое число атрибутов и их значений. В последующем они записываются в нереляционную систему управления базами данных (*NoSQL*), адаптированную (специально сформированную) для хранения слабоструктурированных данных. Примерами таких атрибутов могут быть: хеш-сумма файла (*Hash*), имя файла (*Name*), полный путь к файлу (*Directory*), тип файла (*Type*), права файла (*Permission*), дата создания файла (*Date*), название процесса (*NamePid*), *pid* процесса (*Pid*), тип протокола (*Protocol*) и многие другие. Далее для поиска цифровых уликов описываются взаимосвязи между атрибутами и их значениями.

Немаловажным этапом является распределение полученных данных на пользовательские и системные. В дальнейшем происходит применение интеллектуальных алгоритмов для выявления класса и экземпляра инцидента, его формализация и визуализация.

Предлагаемая система, в отличие от существующих (*EnCase*, *FTK* и других), учитывает данные с жесткого диска, оперативной памяти и сети одновременно, что позволяет повысить точность обнаружения компьютерного инцидента в средствах вычислительной техники. В условиях роста объемов данных и числа компьютерных инцидентов система будет давать высокие показатели качества, что позволит снизить вероятность ошибки человека-эксперта, участвующего в проведении исследований средств вычислительной техники.

Заключение

Актуальность организации расследования инцидентов в области высоких технологий очень высока, особенно в России, где преступления, совершенные с использованием вычислительной техники, зачастую остаются нераскрытыми. Связано это в основном с отсутствием не только подготовленного персонала, но и технических средств, позволяющих получить цифровые улики.

Предложенная в проекте система позволяет решать актуальные практические и теоретические задачи расследования компьютерных инцидентов на новом качественном уровне в условиях постоянного роста их числа, а также увеличения объемов хранимой и обрабатываемой информации. Реализация и внедрение системы позволит снизить вероятность ошибки человека-эксперта, участвующего в исследовании компьютерного инцидента, а также снизить временные затраты на получение доказательной базы с конкретного средства вычислительной техники. Система может применяться в расследовании компьютерных инцидентов, обеспечении оперативного реагирования на них, а также для создания рекомендаций по защите от подобных ситуаций в дальнейшем. Новые методы и наборы экспериментальных данных необходимы для предиктивной защиты от компьютерных инцидентов в режиме реального времени.

Разрабатываемая система будет использоваться в информационно-коммуникационных системах, средствах вычислительной техники, центрах обработки данных для решения задач

выявления компьютерных инцидентов, а также в построении предиктивных систем защиты от компьютерных атак.

Публикации

1. *Пантюхин И.С. и др.* Способ исследования компьютерных инцидентов на основе кластеризации атрибутов // Безопасность информационных технологий. 2018. Т. 25. № 3. С. 38–44.
2. *Пантюхин И.С. и др.* Снижение объема обрабатываемой информации в энергозависимой памяти при исследовании компьютерных инцидентов // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 2 (26). С. 70–76.
3. *Pantiukhin I.S. et al.* Testing of the hypothesis in the research of computer incidents on the basis of the analysis of attributes and their values // Proceedings of the 20th Conference of Open Innovations Association FRUCT. Saint Petersburg, 2017. P. 352–358.
4. *Пантюхин И.С., Зикратов И.А.* Методика проведения постинцидентного внутреннего аудита средств вычислительной техники // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3 (109). С. 467–474.
5. *Пантюхин И.С. и др.* Метод проведения постинцидентного внутреннего аудита средств вычислительной техники на основе графов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3 (103). С. 506–512.
6. *Pantiukhin I.S. et al.* The method of elf-files identification based on the metric classification algorithms // Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association FRUCT. Saint-Petersburg, 2016. P. 397–403.
7. *Pantiukhin I.S. et al.* The method of classification of user and system data based on the attributes // Proceedings of the 18th Conference of Open Innovations Association FRUCT. Saint-Petersburg, 2016. P. 404–409.

Литература

1. *Nelson B. et al.* Guide to computer forensics and investigations: processing digital evidence. 5th ed. Cengage, 2016. – 655 p.
2. *Burdach M.* Physical memory forensics [Electronic resource] // Black Hat Multimedia Archives [Official website]. URL: <https://www.blackhat.com/presentations/bh-usa-06/BH-US-06-Burdach.pdf> (accessed: 15.10.2018).
3. *Ligh M.H. et al.* The art of memory forensics: detecting malware and threats in Windows, Linux, and Mac memory. Wiley, 2014. – 912 p.
4. *Case A., Richard G.G.* Memory forensics: the path forward // Digital Investigation. 2017. Vol. 20. P. 22–33.
5. *Davidoff S., Ham J.* Network forensics: tracking hackers through cyberspace. Prentice Hall, 2012. – 574 p.
6. *Altheide C., Carvey H.* Digital forensics with open source tools. Elsevier, 2011. – 264 p.



Парамонов Алексей Владимирович
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: avr.atrax@gmail.com

АЛГОРИТМЫ ПРЯМОЙ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В НЕУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМАХ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В КАНАЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Парамонов

Научный руководитель – профессор В.О. Никифоров

В статье рассмотрен алгоритм адаптивной компенсации неизвестного возмущения для класса линейных неустойчивых объектов в условиях запаздывания в канале управления с измеряемым и неизмеряемым вектором состояния. Возмущение может быть представлено в виде мультигармонического сигнала. Алгоритм синтезирован с использованием метода прямого адаптивного управления, основанного на принципе внутренней модели без процедуры идентификации параметров возмущения.

Цель проекта – разработка закона адаптивной компенсации неизвестного возмущения для класса линейных неустойчивых объектов в условиях с запаздыванием в канале управления с измеряемым и неизмеряемым вектором состояния.

Технические системы, которые функционируют в условиях неизвестных мультигармонических возмущений с запаздыванием в канале управления, получили широкое распространение. К ним относятся системы виброзащиты, корабельные, антенные и робототехнические системы.

Среди существующих алгоритмов компенсации мультигармонических возмущений в системах с запаздыванием в канале управления можно выделить идентификационный подход, при котором оцениваются частоты, фазы и амплитуды гармоник возмущения и обеспечивается информационная поддержка регулятора [1]. Однако данный алгоритм требует априорной информации, связанной с минимальной разностью между соседними частотами, нижней границей частот возмущения и количеством гармоник.

В рамках настоящего проекта рассматривается решение компенсации неизвестного возмущения с помощью метода прямого адаптивного управления. В этом случае производится непосредственная настройка алгоритма управления с целью обеспечения желаемых свойств замкнутой системы без проведения идентификации параметров возмущения и с использованием минимальной априорной информации о внешнем возмущении: требуется знание только количества гармоник в сигнале, без предварительных оценок частот.

Постановка задачи

Линейный непрерывный стационарный объект управления рассматривается в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}(u(t - \tau) + \delta(t)), \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ – вектор переменных состояния; u – управляющий вход; y – выходная переменная; $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ – матрицы и вектора соответствующих размерностей с известными параметрами; τ – известное запаздывание по входу; δ – неизмеряемое ограниченное детерминированное (мультигармоническое) внешнее возмущающее воздействие, которое может быть представлено как выход автономного генератора:

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \mathbf{H}\mathbf{z}(t) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{\Gamma}\mathbf{z}(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$ – неизмеряемый вектор состояния генератора; $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – матрица постоянных коэффициентов, все собственные значения которой являются некрратными и лежат на мнимой оси; $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{1 \times m}$ – постоянный вектор. Пара $(\mathbf{\Gamma}, \mathbf{H})$ является полностью наблюдаемой. Размерность автономного генератора m предполагается известной, коэффициенты матрицы $\mathbf{\Gamma}$ и вектора \mathbf{H} неизвестны.

Задача 1. Необходимо найти алгоритм управления, обеспечивающий при любых начальных условиях ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и асимптотическую сходимость вектора состояния к нулю.

Если вектор состояния объекта управления (1) недоступен прямым измерениям, то формулируется задача адаптивного управления по выходу.

Задача 2. Необходимо найти закон управления, обеспечивающий при любых начальных условиях ограниченность всех сигналов в замкнутой системе и асимптотическую сходимость выходной переменной к нулю.

Рассматриваемый объект управления (1), подверженный влиянию внешнего возмущения, может быть неустойчивым. Поэтому искомый алгоритм управления предлагается формировать в виде суммы двух компонент:

$$u = u_s + u_c, \quad (3)$$

где u_s – стабилизирующая компонента, u_c – компенсирующая компонента.

Алгоритм адаптивной компенсации при управлении по состоянию

Известно, что возмущение (2) может быть представлено в виде линейной регрессионной модели [2]:

$$\delta = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\xi}, \quad (4)$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\xi} + \mathbf{1}\delta, \quad (5)$$

где $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – произвольная гурвицева матрица, образующая с вектором $\mathbf{1} \in \mathbb{R}^m$ полностью управляемую пару; $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^m$ – вектор неизвестных параметров модели (2).

Для оценки вектора состояния $\boldsymbol{\xi}$ фильтра (5) используется физически реализуемый наблюдатель [2]:

$$\hat{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{N}\mathbf{x}, \quad (6)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\eta} + (\mathbf{G}\mathbf{N} - \mathbf{N}\mathbf{A})\mathbf{x} - \mathbf{N}\mathbf{b}u(t - \tau),$$

где $\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^m$ – вспомогательный вектор, а матрица $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ удовлетворяет равенству $\mathbf{N}\mathbf{b} = \mathbf{1}$.

Путем замены неизвестного вектора $\boldsymbol{\xi}$ на его оценку $\hat{\boldsymbol{\xi}}$, наблюдатель (6) позволяет представить внешнее возмущающее воздействие (2) в следующем параметризованном виде:

$$\hat{\delta} = \boldsymbol{\theta}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}. \quad (7)$$

Поскольку объект работает в условиях запаздывания по управлению, строится предиктор:

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}(t + \tau) = \exp\{(\mathbf{G} + \mathbf{1}\boldsymbol{\theta}^T)\tau\} \hat{\boldsymbol{\xi}}(t). \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет построить оценку упреждающего значения параметризованного возмущения (7):

$$\hat{\delta}(t + \tau) = \boldsymbol{\Psi}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}(t), \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\Psi}^T = \boldsymbol{\theta}^T \exp\{(\mathbf{G} + \mathbf{10}^T)\tau\}$.

Компенсирующая компонента u_c формируется на основе принципа непосредственной компенсации:

$$u_c = -\hat{\boldsymbol{\Psi}}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}, \quad (10)$$

где $\hat{\boldsymbol{\Psi}}$ – настраиваемые параметры алгоритма компенсации возмущения.

С помощью алгоритма адаптации осуществляется непосредственная настройка параметров $\hat{\boldsymbol{\Psi}}$ с целью обеспечения работы желаемого закона управления. Чтобы система сохраняла устойчивость для произвольных значений запаздывания и при наличии неустойчивой матрицы \mathbf{A} , сформируем настраиваемую модель ошибки:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + \boldsymbol{\phi}, \quad (11)$$

где сигнал $\boldsymbol{\phi}$ генерируется фильтром вида:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\phi} + \mathbf{L}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}(\hat{\boldsymbol{\Psi}}^T(t - \tau) - \hat{\boldsymbol{\Psi}}^T)\hat{\boldsymbol{\xi}}(t - \tau) - \mathbf{b}u_s(t - \tau), \quad (12)$$

причем матрица \mathbf{L} выбрана такой, что матрица $\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \mathbf{L}$ – гурвицева. Дифференцируя $\hat{\mathbf{x}}$ с учетом (12), получаем настраиваемую модель ошибки:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \bar{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}\tilde{\boldsymbol{\Psi}}^T \hat{\boldsymbol{\xi}}(t - \tau), \quad (13)$$

которая определяет структуру алгоритма адаптации:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\Psi}}} = \gamma \hat{\boldsymbol{\xi}}(t - \tau) \mathbf{b}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{x}} \quad (14)$$

В соответствии с известным подходом стабилизирующая компонента управления выбрана в следующем виде:

$$u_s(t) = \mathbf{K} \left(e^{\mathbf{A}\tau} \mathbf{x}(t) + \int_{t-\tau}^t e^{\mathbf{A}(t-\mu)} \mathbf{b}u_s(\mu) d\mu \right), \quad (15)$$

где выражение в скобках является оценкой упреждающего значения вектора $x(t)$ через τ секунд, вектор $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ выбран такой, что матрица $\mathbf{A} + \mathbf{bK}$, гурвицева.

В результате в замкнутой системе, состоящей из (1), (3), (6), (10–12), (14) и (15), обеспечивается ограниченность всех сигналов и асимптотическая сходимость вектора состояния \mathbf{x} к нулю.

Алгоритм адаптивной компенсации при управлении по выходу

Если вектор состояния x недоступен для прямых измерений, опишем объект управления (1) в виде соотношения «вход – выход»:

$$y(t) = H(s)[u(t - \tau) + \delta], \quad (16)$$

где $H(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b} = \frac{\beta(s)}{\alpha(s)}$.

Полиномы $\alpha(s)$ и $\beta(s)$ с известными постоянными коэффициентами a_i и b_j являются такими, что:

$$\alpha(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0,$$

$$\beta(s) = b_q s^q + b_{q-1} s^{q-1} + \dots + b_1 s + b_0,$$

где $n > q$. Полином $\beta(s)$ гурвицев.

Для построения физически реализуемого наблюдателя возмущения была сформирована оценка вектора состояния объекта:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_E \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{k}y - \mathbf{a}u + \mathbf{b}u(t - \tau), \quad (17)$$

где вектор $\mathbf{k} = \text{col}(k_1, k_2, \dots, k_n)$ выбран таким образом, что полином $\alpha_E(s) = s^n + k_1 s^{n-1} + \dots + k_{n-1} s + k_n$ гурвицев, \mathbf{A}_E – сопровождающая матрица полинома $\alpha_E(s)$, $\mathbf{a} = \text{col}(a_{n-1}, \dots, a_0)$, $\mathbf{b} = \text{col}(0, \dots, b_q, \dots, b_0)$.

Регулируемую переменную y можно представить в виде:

$$y = \bar{y} + \bar{\delta}, \quad (18)$$

где $\bar{y} = \mathbf{e}_1^T \hat{\mathbf{x}}$, $\mathbf{e}_1 = \text{col}(1, 0, \dots, 0)$, $\bar{\delta}$ является отфильтрованным возмущением, которое можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= W(s)[\delta], \\ W(s) &= \mathbf{e}_1^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_E)^{-1} \mathbf{b}. \end{aligned} \quad (19)$$

Тогда наблюдатель возмущающего воздействия может быть представлен как:

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\phi} + \mathbf{I}(y - \bar{y}), \quad (20)$$

где $\boldsymbol{\phi} \in \mathbf{R}^m$, $\mathbf{G} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ – произвольная гурвицева матрица, образующая с вектором $\mathbf{I} \in \mathbf{R}^m$ полностью управляемую пару.

В результате фильтрованное возмущение может быть расписано в параметризованном виде:

$$\bar{\delta} = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\phi}, \quad (21)$$

где $\boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^m$ – вектор неизвестных постоянных коэффициентов, вектор $\boldsymbol{\phi}$ формируется наблюдателем (20).

С учетом (17)–(21) регулируемая переменная y объекта управления (21) может быть представлена как:

$$y = \mathbf{e}_1^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_E)^{-1} (\mathbf{k} - \mathbf{a})[y] + W(s)[u(t - \tau)] + \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\phi}. \quad (22)$$

Структура компенсирующей компоненты определяется в соответствии с принципом непосредственной компенсации и свойством возмущения в линейной регрессионной форме [2]:

$$u_c(t) = -\frac{\alpha_E(s)}{\beta(s)} [\hat{\boldsymbol{\psi}}^T \boldsymbol{\phi}] = -\frac{1}{\beta(s)} [\hat{\boldsymbol{\psi}}^T \boldsymbol{\phi}]. \quad (23)$$

Чтобы построить алгоритм адаптации, который бы обеспечил формирование настраиваемых параметров $\hat{\boldsymbol{\psi}}$ для неустойчивого объекта с запаздыванием в канале управления, был введен в рассмотрение сигнал расширенной ошибки:

$$\hat{y} = y + \tilde{y}, \quad (24)$$

$$\text{где } \tilde{y} = \frac{1}{\alpha_E(s)} [\hat{\boldsymbol{\psi}}^T (t - \tau) \boldsymbol{\phi}(t - \tau)] - \hat{\boldsymbol{\psi}}^T \bar{\boldsymbol{\phi}}(t - \tau) - \mathbf{e}_1^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_E)^{-1} (\mathbf{k} - \mathbf{a})[y] - W(s)[u_s(t - \tau)],$$

$$\bar{\boldsymbol{\phi}}(t - \tau) = \frac{1}{\alpha_E(s)} [\boldsymbol{\phi}(t - \tau)].$$

Тогда, с учетом (21)–(23) модель (24) можно представить как:

$$\hat{y} = \tilde{\Psi}^T \bar{\Phi}(t - \tau). \quad (25)$$

В результате сигнал расширенной ошибки позволяет синтезировать алгоритм адаптации вида:

$$\dot{\hat{\Psi}} = \gamma \bar{\Phi}(t - \tau) \hat{y}. \quad (26)$$

Для решения задачи стабилизации был построен наблюдатель вектора состояния объекта управления с учетом контура компенсации:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_c = \mathbf{A}_E \hat{\mathbf{x}}_c + \mathbf{k}y - \mathbf{a}y + \mathbf{b}u_s(t - \tau). \quad (27)$$

Тогда стабилизирующая компонента управления может быть представлена в виде:

$$u_s(t) = \mathbf{K} \left(e^{\mathbf{A}\tau} \hat{\mathbf{x}}_c(t) + \int_{t-\tau}^t e^{\mathbf{A}(\tau-\mu)} \mathbf{b}u_s(\mu) d\mu \right), \quad (28)$$

где \mathbf{A} – сопровождающая матрица полинома $\alpha(s)$, вектор $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ выбран такой, что матрица $\mathbf{A} + \mathbf{bK}$ гурвицева,

Итак, в замкнутой системе, состоящей из (3), (16), (17), (20), (23), (24), (26)–(28), обеспечивается ограниченность всех сигналов и асимптотическая сходимость выходной переменной y к нулю.

Заключение

В рамках проекта был разработан метод прямой адаптивной компенсации возмущения и запаздывания для линейных неустойчивых объектов, который обеспечивают компенсацию неопределенностей моделей, возмущений и запаздывания, устойчивость замкнутой системы при любых начальных условиях, ограниченность всех сигналов и выполнение всех целевых условий.

Полученные результаты могут быть внедрены в системы управления морскими, космическими и робототехническими объектами, в устройства подавления вибраций, в системы управления технологическими процессами и другие технические системы, которые подвержены влиянию гармонического возмущения и имеют запаздывание в каналах управления.

Публикации

1. *Paramonov A.V. et al.* Adaptive disturbance compensation in delayed linear systems: Internal model approach // IEEE Conference on Control Applications (CCA). Sydney, 2015. P. 1692–1696.
2. *Paramonov A.V. et al.* Adaptive disturbance compensation in linear systems with input arbitrary delay: internal model approach // 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Lisbon, 2016. P. 304–309.

Литература

1. *Pyrkin A.A. et al.* Output control approach for delayed linear systems with adaptive rejection of multiharmonic disturbance // 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control. Cape Town, 2014. P. 12110–12115.
2. *Никифоров В.О.* Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб., 2003. – 282 с.



Переязбова Татьяна Павловна
Факультет фотоники и оптоинформатики
E-mail: pereziabova@gmail.com

ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОПРУЖИНЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРАХ

Т.П. Переязбова

Научный руководитель – профессор А.В. Федоров

В работе представлена квантово-механическая модель, описывающая оптические свойства полупроводниковых нанопружин. Разработанная теория позволяет вычислить спектры поглощения и кругового дихроизма нанопружин с различными геометрическими параметрами. Показано, что сигнал кругового дихроизма полупроводниковой нанопружины обладает сильной анизотропией и значительно превосходит сигналы других хиральных нанокристаллов.

Оптические свойства хиральных нанокристаллов – одна из набирающих актуальность тем в физике низкоразмерных систем [1, 2]. Интерес научного сообщества вызван более сильным хирально-оптическим откликом нанокристаллов в сравнении с органическими молекулами. Полупроводниковые нанопружины также обладают хиральной конфигурацией, которая присуща многим оптически активным органическим молекулам, включая ДНК, протеины, сахара [3]. В связи с хиральной симметрией нанопружин в течение последних двух десятилетий было проведено большое количество экспериментальных исследований, посвященных использованию различных материалов, уменьшению диаметра нанопружин и высоте их шага для достижения квантового конфайнмента [4]. Однако существующая экспериментальная база синтеза и исследования свойств подобных нанокристаллов требует создания теории, достаточно полно описывающей хирально-оптические свойства нанопружин. Таким образом, цель научного проекта – разработка квантово-механической теории, описывающей оптическую активность полупроводниковых нанопружин для применения в химических сенсорах.

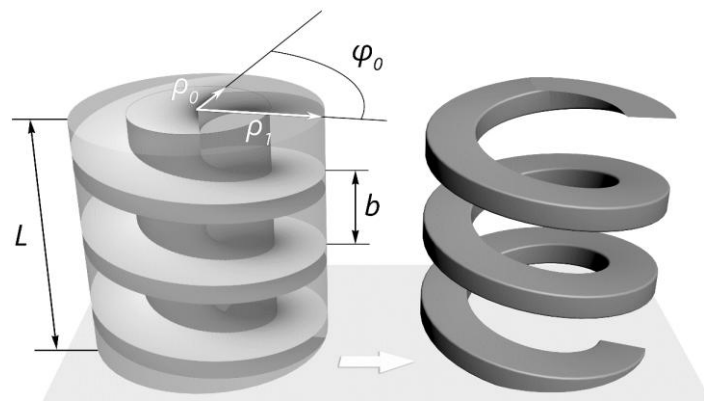


Рис. 1. Ограничивающие поверхности (слева) и модель (справа) нанопружины

Предположим, что полупроводниковая нанопружина представляет собой цилиндрическую пружину с длиной L и высотой витка $|b|$, знак b задает направление закрученности фигуры. Пусть высота витка положительна, если нанопружина имеет правую

направленность, и отрицательна в противоположном случае. Носители заряда ограничены непроницаемыми поверхностями: двумя концентрическими цилиндрическими поверхностями с радиусами ρ_0 и ρ_1 при $\rho_0 < \rho_1$ и двумя геликоидами $z = \beta\varphi$ и $z = \beta(\varphi - \varphi_0)$, так что $0 < \varphi_0 \leq 2\pi$, где $\beta = b/(2\pi)$, как показано на рис. 1. Стоит отметить, что оси этих геликоидов совпадают с осями цилиндрических поверхностей, а в x -сечении геликоиды отсекают секторы с углом φ_0 от данных цилиндров.

В рамках метода эффективных масс и двузонной модели полупроводника волновые функции и энергетический спектр носителей зарядов в нанопружине могут быть получены при решении уравнения Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right)^2 \right] \psi + V\psi = E\psi,$$

где E – энергия квантования носителей заряда, m – их эффективная масса,

$$V = \begin{cases} 0, \rho_0 \leq \rho \leq \rho_1 \text{ и } \frac{z}{\beta} \leq \varphi \leq \frac{z}{\beta} + \varphi_0 \text{ и } 0 \leq z \leq L, \\ \infty, \text{ в остальных случаях.} \end{cases}$$

Тогда волновые функции и энергетический спектр носителей зарядов, ограниченных поверхностями нанопружины, записываются следующим образом:

$$\psi_{nlp}(\rho, \varphi, z) = \frac{2}{\rho_1 \sqrt{\varphi_0 L}} r_{nl}(\rho/\rho_1) \sin \lambda_l(\varphi - z/\beta) \sin k_p z,$$

$$E_{nlp} = \frac{\hbar^2}{2m} \left[\left(\frac{\zeta_{nl}}{\rho_1} \right)^2 + k_p^2 \right],$$

где $\lambda_l = \pi l / \varphi_0$, $k_p = \pi p / L$, $l, p = 1, 2, 3, \dots$,

$$r_{nl}(x) = a_{nl} [J_\lambda(\zeta_{nl}x) + b_{nl} Y_\lambda(\zeta_{nl}x)],$$

$$a_{nl} = 2\sqrt{2} \left\{ \left[J_{\lambda-1}(\zeta_{nl}) - J_{\lambda+1}(\zeta_{nl}) + b_{nl} [Y_{\lambda-1}(\zeta_{nl}) - Y_{\lambda+1}(\zeta_{nl})] \right]^2 - \kappa^2 \left[J_{\lambda-1}(\zeta_{nl}\kappa) - J_{\lambda+1}(\zeta_{nl}\kappa) + b_{nl} [Y_{\lambda-1}(\zeta_{nl}\kappa) - Y_{\lambda+1}(\zeta_{nl}\kappa)] \right]^2 \right\}^{-1/2},$$

$$b_{nl} = -\frac{J_\lambda(\zeta_{nl})}{Y_\lambda(\zeta_{nl})},$$

$J_\lambda(x)$ и $Y_\lambda(x)$, $\lambda = \lambda_l$, $\kappa = \rho_0 / \rho_1$, где ζ_{nl} -й корень секулярного уравнения $J_\lambda(\zeta_{nl})Y_\lambda(\kappa\zeta_{nl}) = J_\lambda(\kappa\zeta_{nl})Y_\lambda(\zeta_{nl})$.

Огибающие волновых функций первых четырех энергетических уровней представлены на рис. 2(a-z).

Предположим теперь, что нанопружина имеет один электрон проводимости и, как следствие, отрицательно заряжена. Допустим, что электрон находится в начальном состоянии $|i\rangle$, которое задается набором из трех квантовых чисел $i = (n, l, p)$. Рассмотрим вероятность перехода из состояния $|i\rangle$ в состояние $|f\rangle$ с набором квантовых чисел

$f = (n', l', p')$ при поглощении света. Используя золотое правило Ферми, можно показать, что вероятность перехода с энергией E в единицу времени дается выражением:

$$w_{i \rightarrow f}^{(\lambda)}(E) = \frac{4\pi}{\hbar} |\langle f | H_\lambda | i \rangle|^2 \delta(E - E_f + E_i),$$

где Гамильтониан взаимодействия со светом может быть записан следующим образом:

$$H_\lambda = -\frac{e}{mc} A(\omega) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} (\mathbf{e}_\lambda \cdot \mathbf{p}),$$

где c – скорость света, $A(\omega)$ – действительная амплитуда векторного потенциала, \mathbf{k} – волновой вектор света, \mathbf{e}_λ – вектор поляризации света, \mathbf{r} и ∇ – операторы радиуса вектора

и импульса. Интенсивность света записывается как $I(\omega) = \frac{\omega^2}{2\pi c} |A(\omega)|^2$.

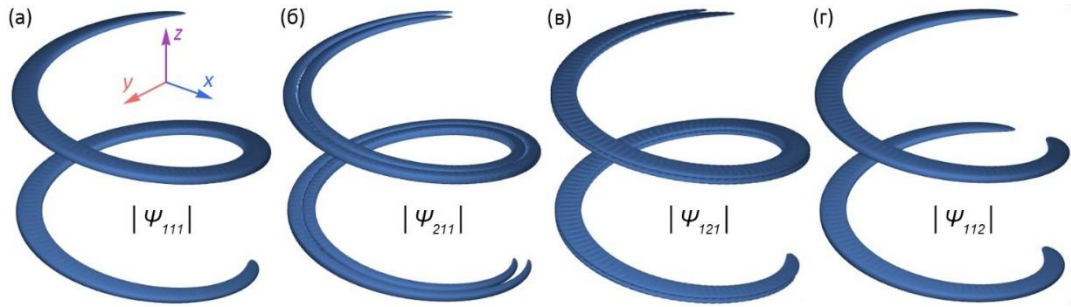


Рис. 2. Изоповерхности огибающих волновых функций основного уровня ψ_{111} и первых трех возбужденных ψ_{211} , ψ_{121} и ψ_{112}

Выражения для вероятности перехода при взаимодействии нанопружины с левополяризованным и правополяризованным излучением теперь преобразуются к виду:

$$w_{i \rightarrow f}^{(L)}(E) = \frac{4\pi^2 e^2}{k c \hbar m^2 \omega^2} I(\omega) \left[|\mathbf{p}_{fi}|^2 - |\mathbf{p}_{fi} \cdot \mathbf{u}|^2 + \epsilon k^2 \left(|(\mathbf{p} \otimes \mathbf{r})_{fi} \cdot \mathbf{u}|^2 - |\mathbf{u} \cdot (\mathbf{p} \otimes \mathbf{r})_{fi}|^2 \right) \right] \delta(E - E_f + E_i)$$

и

$$w_{i \rightarrow f}^{(R)}(E) = \frac{4\pi^2 e^2 \sqrt{\epsilon}}{c \hbar m^2 \omega^2} I(\omega) [\mathbf{p}_{if} \times (\mathbf{p} \otimes \mathbf{r})_{fi}] \cdot \mathbf{u} \delta(E - E_f + E_i),$$

где $\mathbf{p}_{fi} = \langle f | \mathbf{p} | i \rangle$, $(\mathbf{p} \otimes \mathbf{r})_{fi} = \langle f | \mathbf{p} \otimes \mathbf{r} | i \rangle$ и знак \otimes означает тензорное умножение векторов.

Используя циклические ковариантные координаты $(+1, 0, -1)$, можно записать:

$$\mathbf{r} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -\rho e^{i\varphi} \\ \sqrt{2}z \\ \rho e^{-i\varphi} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{p} = -\frac{\hbar}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{i\varphi} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} - i \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \\ i\sqrt{2} \frac{\partial}{\partial z} \\ e^{-i\varphi} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} + i \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta e^{i\varphi} \\ \cos \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta e^{-i\varphi} \end{pmatrix},$$

где θ и φ – сферические координаты \mathbf{u} .

Разработанная теория позволяет рассчитать спектры поглощения и кругового дихроизма ансамбля полупроводниковых нанопружин:

$$A_{nl}(\omega) = \frac{N \hbar \omega}{2I} \sum_{f,p} s_p w_{nlp \rightarrow f}^{(+)}(\omega)$$

и

$$CD_{nl}(\omega) = \frac{N\hbar\omega}{I} \sum_{f,p} s_p w_{nlp \rightarrow f}^{(-)}(\omega),$$

где N – концентрация нанопружин, s_p – распределение Больцмана, $w_{nlp \rightarrow f}^{(\pm)}(\omega)$ – сумма и разность вероятностей переходов при взаимодействии нанопружины с лево- и правополяризованным излучением.

На рис. 3 показана анизотропия поглощения и кругового дихроизма при внутризонном переходе из основного уровня $CdSe$ нанопружины при комнатной температуре. Отрицательный пик кругового дихроизма при 260 мэВ совпадает с пиком поглощения, возникающим в результате диполь-разрешенных переходов, в то время как пик кругового дихроизма при 310 мэВ соответствует более слабому поглощению на диполь-запрещенных переходах. Наиболее сильное поглощение происходит, когда излучение падает вдоль оси нанопружины, а максимальный сигнал кругового дихроизма наблюдается, если \mathbf{k} немного наклонена относительно этой оси. Это наглядно продемонстрировано на сферических графиках спектров поглощения и кругового дихроизма на рис. 3(д–е) на длине волны 260 мэВ. Спектр поглощения имеет относительно широкую «талию», перпендикулярную оси z , при этом сигнал кругового дихроизма строго анизотропен и представляет собой гантелю, наклоненную приблизительно на 14° .

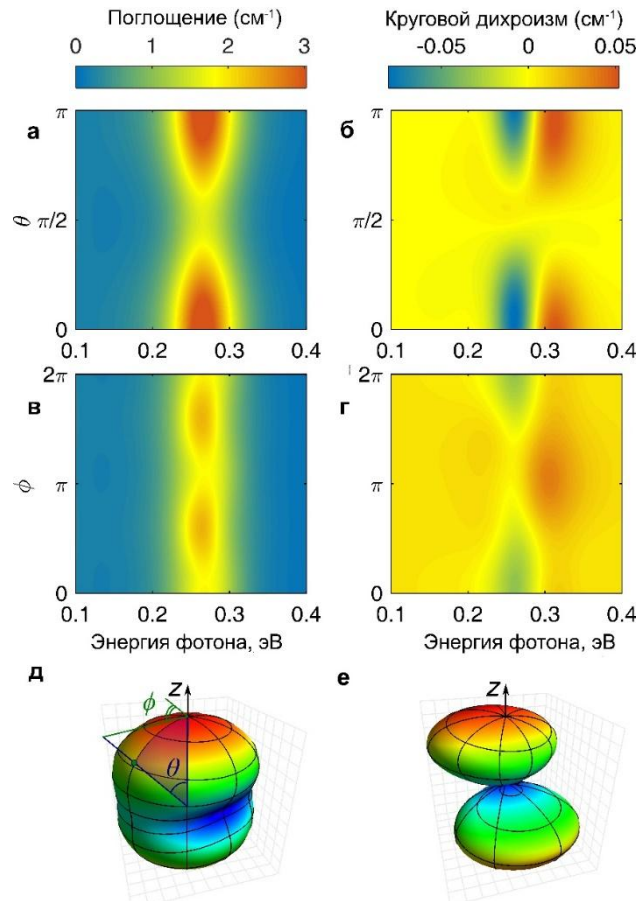


Рис. 3. Спектры поглощения (слева) и кругового дихроизма (справа) $CdSe$ нанопружины в случае: а–б – $\phi = \pi/3$; в–г – $\theta = \pi/3$; д–е – $A_{11}(\theta, \phi)$ и $CD_{11}(\theta, \phi)$ в сферических координатах

В связи с хиральной симметрией полупроводниковой нанопружины абсолютное значение ее оптической активности достаточно высоко. Например, эллиптичность пика кругового дихроизма при 260 мэВ составляет примерно 1° для $h = 1$ см. Подобные значения

оптической активности типичны для металлических нанопружин, однако для полупроводниковых нанокристаллов других хиральных форм подобные значения еще не были получены.

В результате в научном проекте был проведен анализ хирально-оптических свойств полупроводниковых нанопружин. Используя полученные волновые функции и энергетический спектр носителей заряда, ограниченных CdSe нанопружинами, были рассчитаны их спектры поглощения и кругового дихроизма. Стоит отметить, что сигнал кругового дихроизма полупроводниковой нанопружины обладает сильной анизотропией и значительно превосходит таковой у полупроводниковых нанокристаллов другой хиральной формы. Результаты, полученные в ходе выполнения научного проекта, могут быть использованы в биомедицине и фармакологии.

Публикации

1. *Perezjabova T.P. et al.* Optically active semiconductor nanosprings for tunable chiral nanophotonics // *ACS Nano*. 2018. Vol. 12. No 6. P. 6203–6209.
2. *Perezjabova T.P. et al.* Optical activity of semiconductor nanosprings with an extra electron // *Photonic Colloidal Nanostructures: Synthesis, Properties, and Applications (PCNSPA): book of abstracts*. Saint Petersburg, 2018. P. 37.
3. *Переязбова Т.П., Баймуратов А.С.* Круговой дихроизм полупроводниковых нанопружин [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2018. URL: http://old.kmu.itmo.ru/collections_article/7465/krugovoy_dihroizm_poluprovodnikovyh_nanoprzhin.htm (дата обращения: 31.01.2019).
4. *Perezjabova T.P. et al.* Optical anisotropy of topologically distorted semiconductor nanocrystals // *Nano Letters*. 2017. Vol. 17. No 9. P. 5514–5520.
5. *Переязбова Т.П., Баймуратов А.С.* Энергетическая подсистема полупроводниковых нанопружин и хиральных нанолент [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2017. URL: http://old.kmu.itmo.ru/collections_article/5220/energeticheskaya_podsistema_poluprovodnikovyh_nanoprzhin_i_hiralnyh_nanolent.htm (дата обращения: 31.01.2019).

Литература

1. *Ben-Moshe A. et al.* Chirality and chiroptical effects in inorganic nanocrystal systems with plasmon and exciton resonances // *Chemical Society Reviews*. 2013. Vol. 42. No 16. P. 7028–7041.
2. *Wang Y. et al.* Emerging chirality in nanoscience // *Chemical Society Reviews*. 2013. Vol. 42. No 7. P. 2930–2962.
3. *Ren Z., Gao P.-X.* A review of helical nanostructures: growth theories, synthesis strategies and properties // *Nanoscale*. 2014. Vol. 6. No 16. P. 9366–9400.
4. *Zhou W., Wang Z.L.* Three-dimensional nanoarchitectures: Designing next-generation devices. New York, 2011. – 538 p.



Пинкевич Василий Юрьевич
Факультет программной инженерии и компьютерной техники
E-mail: vasily.pinkevich@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕСТИРОВАНИЯ И ОТЛАДКИ ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УРОВНЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

В.Ю. Пинкевич

Научный руководитель – профессор А.Е. Платунов

Работа направлена на создание унифицированной формализованной методики организации процессов тестирования и отладки, применимой для широкого класса встраиваемых вычислительных систем (ВсС) инвариантно к способу их реализации. Разработана методика тестирования и отладки ВсС, которая обеспечивает формализацию понятий тестирования, верификации и валидации с позиций уровневого представления ВсС. Также разработан метод выполнения тестовых запусков, который позволяет единообразно описывать тестовое окружение на разных фазах создания ВсС.

Встраиваемые вычислительные системы представляют собой комплексные проекты, при создании которых затрагивается значительное число уровней логической и физической организации системы: от разработки специализированных микросхем до прикладного программирования и проектирования сетевых протоколов. Для создания таких систем необходима вертикальная и горизонтальная интеграция решений из разных областей вычислительной техники, сегодня слабо совместимых между собой по применяемым методам и технологиям проектирования. Это создает барьеры в общении между разработчиками, усложняет комплексный контроль качества, приводит к снижению эффективности проектирования в целом и высокой вероятности возникновения ошибок системного уровня.

Целью настоящей работы является повышение эффективности проектирования и отладки в комплексных проектах ВсС за счет разработки автоматизированных методов и инструментов тестирования, верификации, валидации и отладки с использованием уровневых моделей. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка и исследование методов описания процессов тестирования, верификации, валидации и отладки ВсС с использованием уровневых моделей;
- разработка метода автоматизированного модельно-ориентированного тестирования и отладки в комплексных проектах ВсС.

Существующие работы в основном направлены на решение проблемы проектирования в целом, способы описания целевой системы и процесса проектирования. В них подчеркивается необходимость формализации и унификации проектных решений, отмечается слабая поддержка существующими методами проектирования сложных гетерогенных систем и работы в условиях неопределенности требований. При этом работы, посвященные проблемам формализации тестирования и отладки ВсС, либо относятся к конкретным технологиям, что не позволяет использовать их в проектировании комплексных ВсС, либо носят описательный характер, что затрудняет их применение непосредственно в разработке маршрутов проектирования и тестирования [1, 2].

Уровневое представление вычислительных систем является эффективным способом описания их вертикальной организации, отражающей набор используемых уровней абстракции и организации вычислительного процесса, и соответствующих им технологий разработки, в том числе из разных областей вычислительной техники. Архитектурный стиль «модель – процесс – вычислитель» (МПВ), предложенный А.В. Пенским [3], обладает значительными выразительными возможностями для моделирования уровневой организации вычислительных систем.

Разработанная методика организации процессов тестирования и отладки ВcС в рамках уровневой организации базируется на расширенном архитектурном стиле МПВ и направлена на создание и развитие инструментов и технологий «прозрачного» и сквозного представления проекта ВcС разработчиком на всех этапах. Архитектурный стиль МПВ расширяется для более точного описания природы виртуализации вычислительного процесса. Вводится деление отношения виртуализации между уровнями на два рода (рис. 1).

1. Отношение виртуализации первого рода имеет место, когда модель верхнего уровня не связана с моделью нижнего отношением трансляции, а вычислительный процесс нижнего уровня порождает вычислитель или модель более высокого уровня.

2. Отношение виртуализации второго рода имеет место, когда модели связаны отношением трансляции, а вычислительный процесс нижнего уровня порождает и вычислитель, и вычислительный процесс верхнего уровня, так как в результате выполненной трансляции модель нижнего уровня содержит в себе описание обоих элементов.

Процесс создания ВcС предлагается разбивать на фазы, каждая из которых характеризуется определенным набором технологий и средств разработки. Основные фазы встречаются в большинстве проектов: высокоуровневое проектирование, рабочее проектирование (разработка), изготовление.

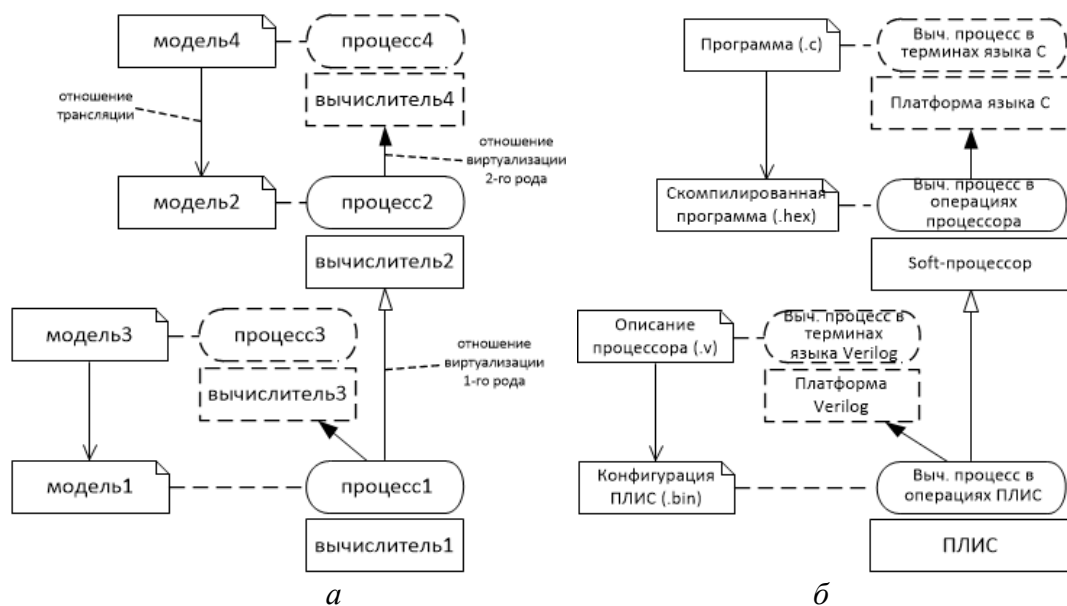


Рис. 1. а – описание уровневой организации встраиваемой системы в рамках расширенного архитектурного стиля «модель – процесс – вычислитель»; б – пример описания системы на программируемой логической интегральной схеме с soft-процессором

В рамках процесса тестирования в узком смысле проверяется выполнение требований к целевой системе. В данной работе под этим понимается проверка и функциональных, и нефункциональных требований (таких как энергопотребление, габаритные размеры, стоимость и других). При этом тест определяется как набор функциональных и/или нефункциональных требований к системе и как способ определения того, выполняются ли они. Такие тесты должны существовать на всех уровнях абстракции ВcС – от исходных

спецификаций (технического задания) до итоговой реализации. Для традиционных функциональных тестов это будут наборы входных данных, способ проведения тестового запуска и т. д. Определим понятие тестирования в узком смысле как разработку множества (множеств) тестов для системы в контексте уровневой модели и их выполнение. При изменении уровневой модели целевой системы необходимо проводить верификацию для проверки корректности новой.

На этапе составления технического задания исходные требования к ВcС часто невозможно сформулировать с достаточной точностью. Составленные по ним множества тестов не будут отражать реальные требования к системе. В связи с этим, необходимо тестировать целевую систему не только с помощью искусственно разработанных множеств тестов, но и в реальном целевом окружении. Данный процесс называется валидацией.

Верификацией будем называть тестирование некоторой реализации целевой системы, которая является развитием исходной реализации с другой уровневой моделью с целью проверки корректности новой системы и ее соответствия исходной.

Если при выполнении тестирования, верификации или валидации возникают ошибки, то необходимо иметь возможность определить, при запуске какого именно теста возникла ошибка (это может быть неочевидно, если проводится тестирование в реальном окружении) и что является ее причиной. Перспективным подходом к отладке плавающих ошибок, повторения которых трудно добиться, является запись и детерминированное воспроизведение поведения системы [4]. Недостатками существующих реализаций данного подхода являются:

- выполнение записи на низком уровне (отдельные команды процессора или двоичные сигналы в заказной микросхеме);
- большой объем журнала (по сравнению с доступными объемами памяти во встраиваемых системах);
- запись и воспроизведение охватывают только один процессор или одну заказную микросхему.

С.В. Быковским был предложен метод долговременного наблюдения за ВcС в рамках высокоуровневой модели ее поведения, заложенной разработчиком, в терминах конечного автомата [5]. Он нацелен на обнаружение отклонений от требуемого поведения. Метод универсален и не зависит от платформы реализации, однако не предоставляет средств для воспроизведения сценария работы, который привел к отклонениям. Предлагаемый подход к решению задач функционального тестирования и отладки ВcС является развитием данного метода и использует запись и детерминированное воспроизведение вычислительного процесса. Для спецификации вычислительного процесса предлагается использовать высокоуровневую опорную модель, которая описывает поведение проверяемой части системы в понятиях прикладной задачи. Опорная модель составляется разработчиком системы, исходя из требований к тестированию и отладке. Применение ее позволяет:

- адаптировать подход с записью и воспроизведением к контролю и отладке прикладных алгоритмов;
- избавиться от привязки к технологии, на базе которой реализована система;
- сократить объем памяти, необходимый для хранения журнала вычислительного процесса.

Благодаря этому одна опорная модель может быть использована при работе с разными представлениями вычислительного процесса, в том числе реализациями на разных уровнях: на высоком уровне в среде моделирования и в виде исходных текстов целевой системы. Также единая опорная модель может описывать системы, имеющие гетерогенную программно-аппаратную реализацию. Для поддержки предлагаемого подхода необходимо внедрить в ВcС специальную тестовую инфраструктуру, которая включает следующие основные компоненты:

– тестовый агент (главный активный компонент инфраструктуры) – отслеживает текущее состояние вычислительного процесса, определяет необходимые действия по записи/воспроизведению в каждый момент времени, а также необходимость сохранения данных в журнал и чтения из него;

– хранилище журналов – требуется для хранения журналов и организации доступа к их записям.

Между целевым вычислительным процессом и тестовым агентом организуется интерфейс для извещения тестового агента о достижении очередной опорной точки, а также для ввода и вывода тестовых данных из него.

В общем случае вычислительный процесс в ВcС можно представить как сеть взаимодействующих процессов, каждый из которых реализует некоторый последовательный алгоритм. Данный подход широко применяется в моделировании и проектировании ВcС. Отдельные процессы при этом могут выполняться как в аппаратно реализованных вычислительных блоках, так и на процессоре, в том числе под управлением операционной системы. При этом внешнее окружение системы тоже может быть представлено как набор процессов (рис. 2).

Для описания опорных моделей целевых вычислительных процессов предлагается использовать модифицированную модель графа потока управления. В модели используется ориентированный граф, который включает начальную, конечную и операторные вершины. Операторные вершины соответствуют точкам вычислительного процесса, в которых вводятся или выводятся данные. Вводимые данные в этих точках могут как записываться, так и воспроизводиться. При одинаковых начальных состояниях воспроизведение тех же входных данных в том же порядке должно всегда обеспечивать одинаковую смену внутренних состояний процесса и генерацию тех же выходных данных. Таким образом, если в опорной модели вычислительного процесса учтены все входные данные, то можно выполнить их запись для последующего воспроизведения.

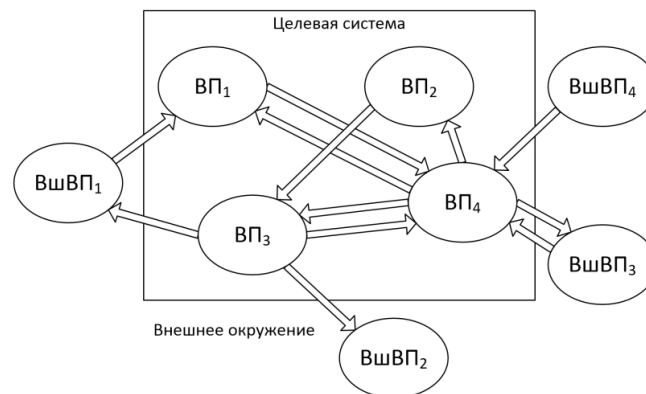


Рис. 2. Модель целевой системы и внешнего окружения в виде сети процессов.
 VP_i – вычислительный процесс целевой системы, $VshVP_i$ – вычислительный процесс внешнего окружения

При использовании частичной записи и воспроизведения возникает задача однозначной идентификации каждого попадания вычислительного процесса в каждую вершину графа и соответствующих записей в журнале. Для этого рассматривается использование нескольких подходов: по полной предыстории переходов, на основе подсчета попаданий в вершины и на основе специальных прикладных счетчиков. Третий подход обладает наибольшими возможностями и преимуществами, с точки зрения использования ресурсов ВcС. Для него вводятся правила пометок и доказываются свойства возможности воспроизведения вычислительного процесса.

Для поддержки применения предлагаемого метода тестирования и отладки с детерминированным воспроизведением разработаны прототипы автоматизированных

средств работы с опорными моделями и журналами, а также генерации загрузочных образов для резидентной тестовой инфраструктуры.

Публикации

1. *Pinkevich V.Y., Platunov A.E.* Model-driven functional testing of cyber-physical systems using deterministic replay techniques // Proceedings 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). Saint Petersburg, 2018. P. 141–146.
2. *Пинкевич В.Ю., Платунов А.Е.* Тестирование и отладка встраиваемых вычислительных систем на основе уровневых моделей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 5 (117). С. 801–808.
3. *Pinkevich V.Y. et al.* Computational process specification model for embedded systems testing and debug with record and deterministic replay // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2018): Conference Proceedings. 2018. Vol. 18. No 2.1. P. 231–238.
4. *Pinkevich V.Y. et al.* Hardware computational units design with combined debug capabilities // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2017): Conference Proceedings. 2017. Vol. 17. No 21. P. 77–84.

Литература

1. *Lettnin D., Winterholer M.* Embedded software verification and debugging. New York, 2017. – 208 p.
2. *Платунов А.Е., Яналов Р.И.* Проектирование вычислительных платформ киберфизических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 10. С. 993–998.
3. *Пенской А.В.* Архитектурное документирование встроенных систем с многоуровневой конфигурацией // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 7. С. 527–532.
4. *Honarmand N., Torrellas J.* Replay debugging: leveraging record and replay for program debugging // 2014 ACM/IEEE 41st International Symposium on Computer Architecture (ISCA). Minneapolis, 2014. P. 455–456.
5. *Быковский С.В.* Метод встроенной динамической актуализации функциональных моделей систем на кристалле // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 3. С. 197–202.



Поваров Кирилл Сергеевич
Факультет лазерной и световой инженерии
E-mail: kirillpovarov@yandex.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КООРДИНАТНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

К.С. Поваров

Научный руководитель – доцент С.С. Митрофанов

Разработка многих приборов и систем невозможна без устройств контроля положения объекта. В некоторых системах они являются частью цепи обратной связи. В исследовании

рассмотрена возможность использования позиционно-чувствительных фотоприемников для построения преобразователя угловых перемещений. Оценена погрешность измерения угла, а также погрешности, оказывающие влияние на измерение.

Цель проекта – исследовать точностные характеристики позиционно-чувствительных (координатных) фотоприемников, которые необходимы для построения преобразователей угловых перемещений на их базе.

Задачи:

- провести анализ точностных характеристик фотоприемника «Мультискан»;
- провести анализ угловой погрешности позиционно-чувствительных фотоприемников;
- рассчитать угловую разрешающую способность ПЗС-матрицы;
- определить степень влияния параметров ПЗС-матрицы на ее угловую разрешающую способность;
- проанализировать полученные результаты.

Построение точных систем требует контроля положения рабочего элемента, которым может быть инструмент в системах с числовым программным управлением, манипулятор и т. д. Для определения положения рабочего элемента существуют преобразователи перемещений. Для нахождения пространственного положения используют систему из нескольких таких преобразователей. Иногда требуется знать угловое положение рабочего элемента, в этом случае применяют преобразователи угловых перемещений.

Наиболее точные преобразователи построены на оптических растрах (чередовании черных и белых полос). Такие устройства обладают рядом недостатков.

Первый – относительная сложность конструкции устройства. Преобразователь включает в себя измерительный и индикаторный растр, источник и приемник излучения, вал, корпус, электронные компоненты и т. д. Взаимное расположение растров, источника и приемников излучения оказывает сильное влияние на точность измерений.

Второй недостаток связан с тем, что такие элементы, как оптические растры, должны изготавливаться с высокой точностью. Речь идет не только о высокоточном процессе изготовления детали, но также и об учете режимов обработки готового изделия и нанесении шкал с высокими требованиями к расположению штрихов и соосности. Не следует забывать и о контроле качества, точности изготовления и выполнения заданных требований.

Из двух выше описанных недостатков вытекает третий – высокие затраты на изготовление, в которые включена не только стоимость материалов, но и объем затраченных трудоресурсов. Еще одним недостатком можно считать габаритные размеры угловых преобразователей на оптических растрах. К сожалению, для большей точности необходимо увеличивать количество кодовых дорожек, что приводит к увеличению габаритов.

Избежать этих недостатков можно, используя позиционно-чувствительные фотоприемники, позволяющие строить малогабаритные абсолютные преобразователи угловых перемещений, или кольцевой фотоприемник «Мультискан» и ПЗС-матрицу.

Точностные характеристики фотоприемника «Мультискан» изучены ранее и описаны в статье [1]. Фактическая разрешающая способность кольцевого фотоприемника «Мультискан» составляет $\pm 15''$. Погрешность измерения имеет тот же порядок, что и разрешающая способность. Это хорошие показатели. К этому следует добавить, что габариты фотоприемника 20×20 мм. В ходе исследования выявлено, что на точность преобразователя сильное влияние оказывает эксцентриситет, то есть смещение центра кольца фоточувствительного слоя относительно оси вращения. В статье [2] описаны возможная схема компоновки и конструкция энкодера на базе фотоприемника «Мультискан», которая предполагает для уменьшения погрешности, появляющейся из-за эксцентриситета, применять двухкоординатную рамку, обеспечивающую юстировку положения центра фоточувствительного кольца относительно оси вращения.

При использовании двухкоординатных позиционно-чувствительных фотоприемников эксцентриситет не будет влиять на погрешность измерений. Ведь в этом случае главное – добиться попадания световой марки на активную его зону. Если рассчитывать радиус окружности, описываемый маркой, под определенный размер активной зоны фотоприемника, то обеспечить попадание на активную зону возможно только допусками без дополнительных юстировок.

Но, к сожалению, погрешность измерения положения у многих фотоприемников больше разрешающей способности и составляет в среднем 100 мкм (рис. 1). При такой линейной погрешности угловая составит $\pm 1,5'$. Таким образом, высокой точности при использовании двухкоординатных позиционно-чувствительных фотоприемников добиться не удастся.

Two-dimensional PSD | S1880, S2044

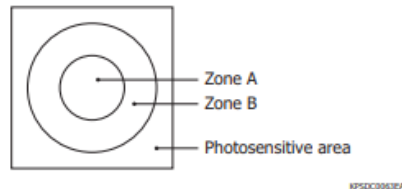
Electrical and optical characteristics (Ta=25 °C unless otherwise noted)

| Parameter | Symbol | Condition | S1880 | | | S2044 | | | Unit |
|-------------------------------|-------------|---------------------------|-------|-------------|-----------|-------|-------------|-----------|---------------|
| | | | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. | |
| Spectral response range | λ | | - | 320 to 1060 | - | - | 320 to 1060 | - | nm |
| Peak sensitivity wavelength | λ_p | | - | 920 | - | - | 920 | - | nm |
| Photosensitivity | S | $\lambda = \lambda_p$ | - | 0.6 | - | - | 0.6 | - | A/W |
| Interelectrode resistance*1 | Rie | Vb=0.1 V | 5 | 10 | 15 | 5 | 10 | 15 | k Ω |
| Position detection error*2 | Zone A | E | - | ± 80 | ± 150 | - | ± 40 | ± 100 | μm |
| | Zone B | | - | ± 150 | ± 250 | - | ± 70 | ± 150 | |
| Saturation current | Ist | Vr=5 V RL=1 k Ω | - | 0.5 | - | - | 0.5 | - | mA |
| Dark current | ID | Vr=5 V | - | 1.0 | 500 | - | 0.5 | 5 | nA |
| Temperature coefficient of ID | TCID | | - | 1.15 | - | - | 1.15 | - | times/°C |
| Rise time | tr | Vr=5 V RL=1 k Ω | - | 1.5 | - | - | 0.3 | - | μs |
| Terminal capacitance | Ct | Vr=5 V f=10 kHz | - | 300 | - | - | 45 | - | pF |
| Position resolution*3 | - | | - | 1.5 | - | - | 0.6 | - | μm |

*1: Measured between two output terminals opposite to each other, and the other terminals are open-circuited on measurement.

*2: The radius of Zones A and B depend on the product type. They are determined as follows:

| Type no. | Zone A (mm) | Zone B (mm) |
|----------|-------------|------------------|
| S1880 | 2.5 | 5 |
| S2044 | 0.9 | 4 × 4 (quadrate) |



*3: Position resolution

This is the minimum detectable light spot displacement. The detection limit is indicated by distance on the photosensitive surface. The numerical value of the resolution of a position sensor using a PSD is proportional to both the length of the PSD and the noise of the measuring system (resolution deteriorates) and inversely proportional to the photocurrent (incident energy) of the PSD (resolution improves).

- * Light source: LED (900 nm)
- * Light spot size: $\phi 200 \mu\text{m}$
- * Frequency range: 1 kHz
- * Photocurrent: 1 μA
- * Circuit system input noise: 1 μV (1 kHz)
- * Interelectrode resistance: Typical value (Refer to specification table.)

Рис. 1. Характеристики двухкоординатного позиционно-чувствительного фотоприемника

Другим видом позиционно-чувствительного фотоприемника можно считать ПЗС-матрицу, которая по сути является декартовой системой координат. Переход от декартовой к полярной системе координат не составит особой сложности.

Для матрицы разрешающей способностью можно считать размер пикселя. В некоторых случаях разрешающую способность легко повысить за счет расфокусировки светового пятна и расчета его центра масс. В таком случае разрешающая способность может быть увеличена до 1/3 пикселя.

Для ПЗС-матрицы теоретическая угловая разрешающая способность описывается выражением:

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin \frac{x}{2R},$$

где φ – угол (рад), x – ширина пикселя (мм), R – радиус описываемой окружности (мм) (рис. 2). Он должен быть выбран исходя из размера фоточувствительной площадки матрицы.

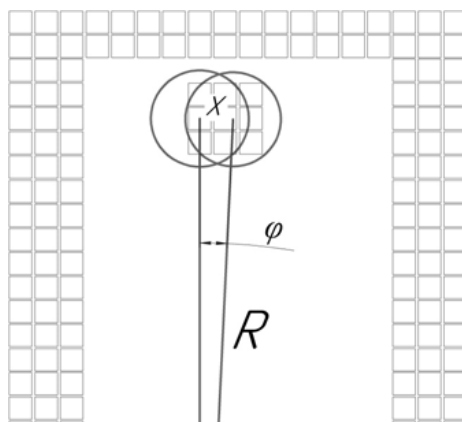


Рис. 2. Определение теоретической разрешающей способности ПЗС-матрицы

Для определения теоретической разрешающей способности матрицы необходимо знать размеры ее чувствительной зоны и пикселя. В Таблице представлены результаты вычислений теоретической угловой разрешающей способности матриц различных производителей.

Таблица

Теоретическая угловая разрешающая способность ПЗС-матрицы

| Матрица | Размер пикселя, мкм | Размер площадки, мм | Разрешение, Н×В, пикс | Радиус, мм | Теор. разр. способность, угл. мин |
|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|------------|-----------------------------------|
| Sony ICX625ALA | 3,45 | 9,93×8,70 | 2448×2050 | 4 | 8 |
| E2V EV76C570 | 4,5 | 7,2×5,4 | 1600×1200 | 2,5 | 17 |
| GPIXEL INC GMAX0504 | 7,4 | 38,0×28,1 | 5144×3800 | 13 | 5 |
| Sony ICX252AQ | 3,45 | 8,10×6,64 | 2048×1536 | 3 | 11 |
| Cmosis CHR70M | 3,1 | 35×24 | 10000×7096 | 10 | 3 |

При расчетах оптимальный диаметр пятна составлял 200 мкм, поэтому по ширине площадки оставался припуск. Линейной погрешностью матрицы считалась диагональ пикселя, так как в некоторых ситуациях при движении марки по окружности эта ситуация дает наибольшую погрешность. Определение центра масс не учитывалось.

Как видно из Таблицы, максимальная точность будет достигаться при размере площадки 35×24 мм и размере пикселя 3,1 мкм.

Хорошими точностными характеристиками обладает кольцевой «Мультискан», но присутствуют дополнительные трудности с влиянием эксцентриситета. Решить эту проблему не сложно, но потребуются дополнительные манипуляции и детали, что усложнит угловой преобразователь и повысит его стоимость. Варианты с позиционно-чувствительным фотоприемником и ПЗС-матрицей лишены влияния эксцентриситета, но показывают меньшую разрешающую способность. Для ряда случаев это будет хорошим решением.

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

Но отказываться от ПЗС-матриц в качестве основы для углового преобразователя не стоит. Необходимо максимально оценить этот вариант, проработать возможные программные способы повышения точности.

Публикации

1. Поваров К.С. и др. Исследование возможности создания малогабаритного преобразователя угол-код на основе позиционно-чувствительного фотоприемника // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 4 (46). С. 32–36.
2. Povarov K.S., Mitrofanov S.S. Investigation of accuracy characteristics of circular photodetector: Multiscan // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10329. P. 103293L.

Литература

1. Поваров К.С., Митрофанов С.С. Исследование точностных характеристик кругового фотоприемника «Мультискан» // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М., 2016. С. 402–403.
2. Поваров К.С., Митрофанов С.С. Компоновка углового энкодера на основе фотоприемника «Мультискан» // XII Международная конференция «Прикладная оптика – 2016»: сборник трудов. СПб., 2016. Т. 2. С. 68–70.



Селедкина Екатерина Андреевна
Факультет лазерной и световой инженерии
E-mail: modest3005@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИЕМА СИГНАЛОВ ЛИДАРА И МЕТОДА ИХ АНАЛИЗА

Е.А. Селедкина

Научный руководитель – профессор А.В. Демин

В данной статье проанализированы методы определения высоты нижней границы облаков, предложены функциональная схема приема сигналов лидара и метод их обработки, которые сокращают количество испускаемых импульсов, тем самым повышают качество выходных данных.

Цель и задачи проекта

Облака являются главным погодообразующим фактором, который оказывает существенное влияние на глобальный радиационный баланс Земли. Характеристики облачности, в особенности высота ее верхней и нижней границ, являются параметрами моделей, используемых для прогноза погоды. Характеристики нижней границы облаков сложнее, чем характеристики верхней границы облачности, для которой основными определяющими параметрами являются инверсия атмосферного температурного профиля, задающая средний уровень границы облака, и турбулентные процессы. Нижняя граница облаков подпитывается теплом и водяным паром, идущими от поверхности земли. В этой области иногда возникает подоблачный слой аэрозолей, из которого выпадают осадки.

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

Высота нижней границы облаков зависит от изменения температуры, влажности, характера выпадающих осадков и скорости ветра [1].

В облакомерах имеются датчики измерения высоты облаков, использующие лазерную технологию, при которой короткие мощные импульсы посылаются в вертикальном или близком к нему направлении. Отраженный импульс и обратное рассеяние (неравномерное отражение), вызванные осадками и облаками, принимаются, измеряются, а затем полученные данные обрабатываются. Но такой датчик не всегда способен представить точные данные о высоте нижней границы облаков, например при сильном ухудшении погодных условий, и поэтому целью проекта является разработка методов анализа эхосигналов лазерного облакомера для достижения точных результатов измерения высоты нижней границы облаков.

Исходя из сказанного, можно выделить следующие задачи проекта:

- моделирование эхосигналов, которые принимаются облакомером, и последующее вычисление их коэффициента ослабления с учетом экспериментальных данных;
- анализ особенностей методов обработки эхосигналов лазерных облакомеров, применяемых для определения параметров атмосферы;
- оценка систематических погрешностей, которые влияют на результаты решения обратной задачи;
- разработка схемы обработки сигналов лидарного зондирования атмосферы и алгоритма, который способен учесть особенности условия зондирования и измерительной аппаратуры.

Используемые методы исследования

В настоящее время высота нижней границы облаков (ВНГО) определяется с помощью дистанционного метода, основой которого является обратное рассеяние лазерного излучения. При отправке в атмосферу короткого лазерного импульса мощность отраженного сигнала $P(z)$, приходящего на приемник лидара, рассчитывается при помощи уравнения лазерного зондирования, которое имеет вид [1]:

$$S(z) = A_n b(z) \alpha_t(z) \exp[-2 \int_0^z \alpha_t(z') dz'], \quad (1)$$

где $S(z) = P(z)z^2$ – мощность эхосигнала; $A_n = \pi P_0 c \tau_u / 2$ – аппаратная постоянная лидара; c – скорость света; τ_u – длительность импульса лидара; r_n – эффективный радиус входного зрачка приемника; $b(z)$ – коэффициент обратного рассеяния; $\alpha_t(z)$ – коэффициент ослабления.

В правой части уравнения (1) содержится два неизвестных параметра: $b(z)$ и $\alpha_t(z)$.

Поэтому в зависимости от качества и количества имеющейся информации о характеристиках атмосферы существуют методы доопределения параметров уравнения:

- метод логарифмической производной и наклонных трасс;
- метод, предполагающий постоянство лидарного отношения по трассе локации $b(z) = const$;
- метод, основанный на аналитическом решении уравнения зондирования.

В первом из них предполагается, что в вертикальном направлении атмосферу можно разделить на несколько горизонтальных слоев, в каждом из которых $b(z) = const$, $\alpha_t(z) = const$. На практике данный метод применяется редко, так как вероятность возникновения ситуаций, при которых сложатся данные условия, невелика.

В методе наклонных трасс осуществляют зондирование в двух наклонных направлениях, характеризующихся зенитными углами θ_1 и θ_2 ($\theta_1 > \theta_2$). Отраженный сигнал

при этом формируется различными объемами однородного слоя атмосферы, расположенного на высоте H . Данный метод устойчив к многократному рассеянию.

В методе последовательных слоев и в итерационном методе трассу зондирования разбивают на ряд слоев толщиной Δ_z . Предполагается, что оптические характеристики атмосферы в каждом из таких слоев постоянны. Методы доопределения параметров уравнения не используются в слабо замутненной атмосфере, так как их решения расходятся.

В третьем варианте диапазоны значений коэффициентов обратного рассеяния, а также ослабления атмосферы и облака заранее рассчитаны (Табл. 1) [2].

Таблица
Коэффициенты обратного рассеяния

| Атмосфера | | Облака | |
|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| $b(z), \text{км}^{-1} \text{ср}^{-1}$ | $\alpha_i(z), \text{км}^{-1}$ | $b(z), \text{км}^{-1} \text{ср}^{-1}$ | $\alpha_i(z), \text{км}^{-1}$ |
| 0,001–0,100 | 0,05–200 | 0,5–50 | 10–100 |

Но для реализации методов, основанных на аналитическом решении уравнения зондирования, существуют два алгоритма: в первом осуществляется осреднение результатов измерений эхосигналов, во втором происходит выбор из ряда измерений такого результата, который с заданной погрешностью совпадает с уровнем нижней границы облаков.

Основные планируемые результаты

Одной из проблем снижения точности и достоверности обработки характеристик высоты нижней границы облаков приведенными выше алгоритмами является то, что результаты измерения формируются в процессе обработки $\{(\mathcal{E}-C)_i\}_1^N$, где $(\mathcal{E}-C)_i$ – эхосигнал i -го сигнала, N – число принятых эхосигналов. В этой связи предлагается вести обработку совокупности $\{(\mathcal{E}-C)_i; (\mathcal{E}-C)_{i(\tau)}\}_{i=1}^M$, где $(\mathcal{E}-C)_{i(\tau)}$ – эхосигнал i -го сигнала с временной задержкой τ , а M – число принятых пар эхосигналов.

При этом достигаются следующие преимущества по сравнению с описанными выше алгоритмами:

- обрабатываются пары одноименных эхосигналов, что в принципе невозможно в описанных выше алгоритмах, поскольку в $\{(\mathcal{E}-C)_i\}_1^N$ каждый $(\mathcal{E}-C)_i$ формально отличается от $(\mathcal{E}-C)_{i+1}$, что усложняет обработку эхосигнала как в плане необходимости увеличения числа N , так и точности определения ВНГО;

- применяется метод корреляционного анализа информации;
- повышается помехоустойчивость и надежность за счет избыточности сообщения.

В соответствии с принципом комплексирования функциональная схема приема эхосигнала $\{(\mathcal{E}-C)_i; (\mathcal{E}-C)_{i(\tau)}\}_{i=1}^M$ может быть представлена в виде (рис. 1), где S – исследуемый сигнал, U_i – напряжение i -го сигнала, $U_{i(\tau)}$ – напряжение i -го сигнала с временной задержкой τ , M_j – совокупность числа измерений j -циклов по i сигналам, U_{M_j} – напряжение обработанного сигнала, F_m – частота модуляции, $K_{M_j}(\tau)$ – автокорреляционная функция сигнала, E – математическое ожидание.

В соответствии с функциональной схемой (рис. 1) алгоритм измерения высоты нижней границы облаков состоит из последовательности действий, представленных ниже.

1. Очищается буфер, то есть во все ячейки буфера заносит значение 0.
2. Дается разрешение на выполнение первого цикла измерения, состоящего из

i импульсов лазера.

3. Выдается команда на запуск лазера.

4. Включается АЦП, каждая полученная величина эхосигнала $\{(\Theta - C)_i; (\Theta - C)_{i(\tau)}\}_1^I$, прибавляется к предыдущему.

5. Пункты 3 и 4 повторяют M раз по i импульсов лазера в каждом, и на этом процесс измерения НГО заканчивается (по теории достаточно $M \approx 7$ циклов и по $I \approx 7$ импульсов).

6. Результаты измерения сохраняются в буфере.

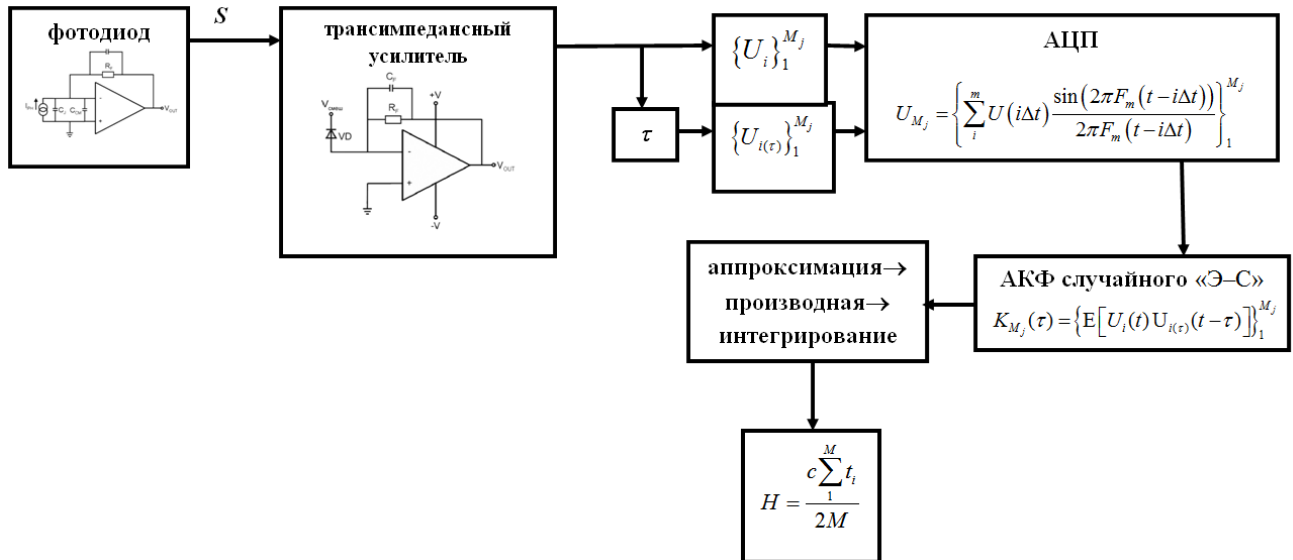


Рис. 1. Функциональная схема приема и обработки эхосигналов, а также определения высоты нижней границы облака

На рис. 2 представлен результат моделирования приведенного алгоритма измерения высоты нижней границы облаков.

Предложенный алгоритм обработки эхосигнала существенно сокращает количество необходимых испускаемых импульсов, тем самым снижая трудоемкость при осуществлении измерений и повышая качество выходных данных, что особенно актуально в сложных метеорологических условиях, таких как наличие осадков и подоблачной дымки.

Области возможного использования результатов проекта

Использование облакомеров является важнейшим инструментом при определении погодных условий, которые крайне необходимы в различных сферах деятельности человека. Это может быть и авиация, где от получения оперативной информации о состоянии нижнего слоя облаков зависит возможность посадки и взлета самолетов, и судоходство, где предварительные данные о погоде необходимы для предупреждения о надвигающемся шторме, а также производство, сельское хозяйство и другие сферы.

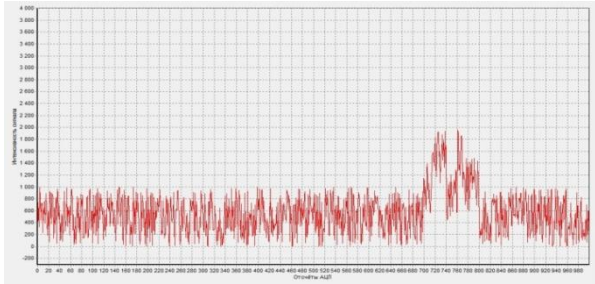
Поэтому разработка функциональной схемы приема сигналов лидара и метода их анализа, которая дает более точные характеристики нижней границы облаков, является приоритетной задачей в настоящее время.

Публикации

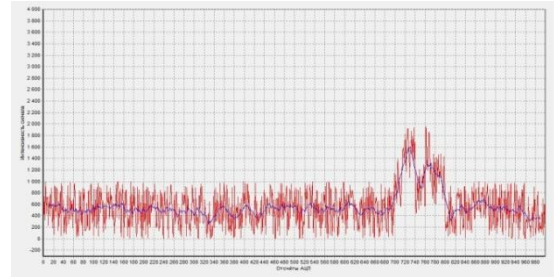
1. Селедкина Е.А., Демин А.В. Оценка точности юстировки составных зеркал интерференционными методами // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 5 (22). С. 127–134.
2. Селедкина Е.А., Демин А.В. Лазерное зондирование нижней границы облаков // Сборник трудов IV Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара, 2017. С. 236–241.

3. *Seledkina E.A. et al.* Application autofluorescence diagnosis method in endoscopy for investigation mucosal structure in gastrointestinal tract // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10239. P. 102390J.

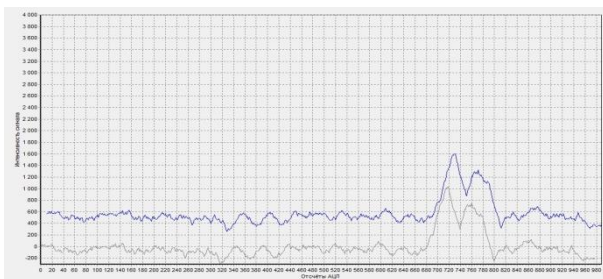
4. *Селедкина Е.А. и др.* Разработка голограммного оптического элемента для лидара // Сборник трудов IV Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара, 2017. С. 245–250.



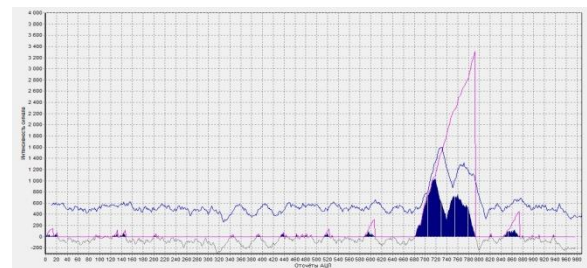
Возможный вид принимаемого эхосигнала $(\Theta - C)_i$



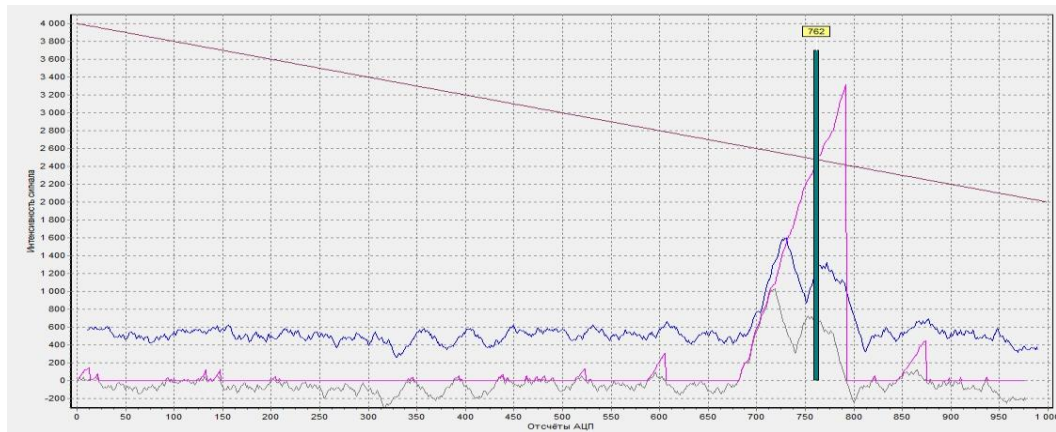
Операция аппроксимации $(\Theta - C)_i$



Операция дифференцирования



Операция интегрирования



Операция сравнения текущего значения интеграла с пороговой кривой при превышении значения интеграла над ней. Данный отсчет принимается как промежуточный результат измерения

Рис. 2. Результат моделирования алгоритма измерения НГО

Литература

1. Орлов В.М. и др. Сигналы и помехи в лазерной локации. М., 1985. – 264 с.
2. Волков О.А. и др. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков ДОЛ-2 // Оптический журнал. 2009. Т. 10. № 76. С. 29–33.



Синетова Мадина Мансуровна
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: sinetovamadina@gmail.com

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ЭЛЕМЕНТА В ЦЕПИ ОСНОВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

М.М. Синетова

Научный руководитель – доцент А.А. Пыркин

Чтобы избежать влияния нелинейного элемента в цепи основной обратной связи, была модифицирована базовая схема Смита включения последовательного компенсатора. Полученные теоретические результаты подтверждены компьютерным исследованием системы с разработанным последовательным компенсатором, включенным по модифицированной схеме Смита для объекта третьего порядка. Исследование показало, что процессы в спроектированной системе нечувствительны к параметрам нелинейного элемента в цепи основной обратной связи, которые при проведении эксперимента изменялись в широком диапазоне.

Цель проекта – модифицировать базовую схему Смита включения последовательного компенсатора, чтобы избежать влияния нелинейного элемента в цепи основной обратной связи.

Задачи:

- исследовать системную ситуацию, которая возникает при включении непрерывного технического объекта в состав системы, основная обратная связь которой содержит нелинейное звено, порождаемое датчиком выходной переменной;
- модифицировать базовую схему Смита включения последовательного компенсатора;
- провести компьютерное исследование системы с разработанным последовательным компенсатором, включенным в нее по модифицированной схеме Смита для случая объекта третьего порядка;
- убедиться, что процессы в спроектированной системе нечувствительны к параметрам нелинейного элемента в цепи основной обратной связи при изменении их в широком диапазоне.

Анализ свойств базовой схемы Смита включения последовательного компенсатора (ПК) в состав устройства управления техническим объектом (ТО) для управления объектом с запаздыванием [1, 2] обнаруживает ее богатые структурные возможности. Вывод звена чистого запаздывания за пределы основного контура управления позволяет решить проблему влияния чистого запаздывания на устойчивость. Достигается это с помощью трехконтурной структуры, один контур которой наделяет проектируемую систему желаемой передаточной функцией «вход – выход», дополненной передаточной функцией звена чистого запаздывания. Два других контура содержат передаточные функции ТО со звеном чистого запаздывания, но характеризуются противоположными знаками обратных связей, чем обеспечивается сигнальное исключение звена чистого запаздывания из основного контура системы.

Трехконтурная структура схемы Смита может быть применена не только для случая формирования устройства управления на основе ПК техническим объектом с запаздыванием в канале управления, но и для случая, когда ТО в канале управления содержит нелинейное

звено. Как и в случае со звеном чистого запаздывания в составе передаточной функции ТО, при наличии нелинейного элемента в его составе оно структурными средствами схемы Смита выводится за пределы основного контура управления. Применим к задаче управления ТО с нелинейным элементом на входе его линейной части с передаточной функцией $W_{ТО}(s)$ подход, заложенный в схеме Смита, в результате чего ПК, включенный по этой схеме, порождает систему, представленную на рис. 1, где $W_{ТО}(s)$, $W_{ПК}(s)$ – передаточные функции ТО и ПК соответственно, $g(t)$ – входное воздействие, $y(t)$ – выход и $\varepsilon(t)$ – ошибка системы, $u(t)$ – сигнал управления, $\hat{y}(t)$ – сигнал обратной связи, $f(y)$ – преобразовательная характеристика нелинейного звена.

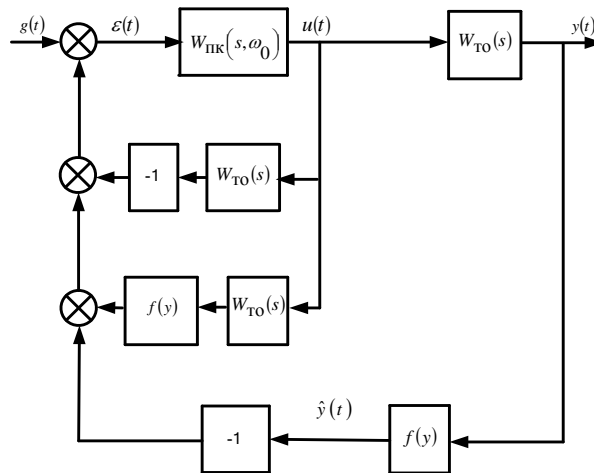


Рис. 1. Структурная схема включения последовательного компенсатора в состав устройства управления техническим объектом с нелинейным элементом на входе по модифицированной схеме Смита

Синтез ПК для управления линейным непрерывным техническим объектом (НТО) в составе системы с линейной единичной отрицательной основной обратной связью осуществим [3] в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Зададим технические требования к показателям качества проектируемой системы в переходном режиме в виде допустимой величины перерегулирования σ_δ и допустимой длительности переходного процесса $t_{П\delta}$, а также в установившемся режиме в виде необходимой величины добротности по скорости $D_{1\delta}$ или величины полосы пропускания $\Delta\omega_{\delta\delta}$ на уровне δ_δ относительной частотной ошибки $\delta(\omega)$.

2. Зададим аналитическое представление передаточной функции $W_{ТО}(s)$ НТО.

3. Зададим передаточную функцию $\Phi(s, \omega_0)$ типовой полиномиальной динамической модели (ТПДМ) [1] отношения «вход – выход» проектируемой системы параметризованной характеристической частотой ω_0 .

4. На основании аналитических связей величин показателей качества проектируемой системы с характеристической частотой ω_0 [1] оценим ее значения в силу правила:

$$\omega_0 = \max \left\{ \omega_0 = \arg(t_n(\omega_0) \leq t_{П\delta}), \omega_0 = \arg(D_1(\omega_0) \geq D_{1\delta}), \omega_0 = \arg(\Delta\omega_\delta(\omega_0) \geq \Delta\omega_{\delta\delta}) \right\}.$$

5. Получим развернутое представление передаточной функции $W(s, \omega_0)$ прямой ветви отношения «ошибка – выход» проектируемой системы, которая принимает вид:

$$W(s, \omega_0) = \frac{y(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{\Phi(s, \omega_0)}{1 - \Phi(s, \omega_0)} = \frac{v_n \omega_0^n}{s^n + v_1 \omega_0 s^{n-1} + \dots + v_{n-1} \omega_0^{n-1} s}.$$

6. Проверим передаточную функцию ПК $W_{ПК}(s, \omega_0) = W(s, \omega_0) / W_{ТО}(s)$ на физическую реализуемость путем контроля ее относительной степени. Если она неотрицательна, то переходим к п. 7 алгоритма, иначе к п. 3 с целью увеличения размерности n ТПДМ.

7. Осуществим комплексное компьютерное исследование системы с предложенным ПК в среде *MATLAB*. В случае получения удовлетворительных показателей качества спроектированной системы, заданных в п. 1, переходим к п. 8, в противном случае – к п. 4 с целью изменения значений характеристической частоты.

8. С помощью процедуры *c2d* в среде *MATLAB* с интервалом дискретности $\Delta t \leq \pi / \left(\frac{v_n}{\delta_y} \right)^{1/n} \omega_0$ осуществим переход от непрерывного представления с передаточной функцией $W_{ПК}(s, \omega_0)$ ПК к его дискретному представлению $W_{ПК}(z, \omega_0)$ с целью программирования микроконтроллера управляющего устройства.

Передаточная функция ТПДМ (п. 3) в задаче синтеза системы управления является желаемой передаточной функцией замкнутой системы, параметризованной характеристической частотой ω_0 . Ее коэффициенты: v_i – определяет тип размещения корней $D(s, \omega_0)$ полинома знаменателя (ПЗ) $\Phi(s, \omega_0)$ и ω_0 – определяет размер области локализации этого размещения. Основным преимуществом такого представления передаточной функции $\Phi(s, \omega_0)$ является то, что ее использование при фиксированных v_i сводит задачу синтеза к однопараметрической задаче поиска значения характеристической частоты ω_0 , от которой зависят длительность переходного процесса, добротность по скорости, частота среза, полоса пропускания на заданном уровне амплитудных частотных характеристик отношений «вход – выход» и «вход – ошибка». В свою очередь, от коэффициентов v_i зависят величина перерегулирования, показатель колебательности и величина запаса устойчивости по фазе.

В случае использования при синтезе систем ТПДМ с размещением Ньютона корней полинома $D(s, \omega_0)$ компоненты v_i его коэффициентов определяются соотношениями $v_i = C_n^i (i = \overline{1, n})$, а при синтезе систем с круговым размещением Баттерворта корней полинома $D(s, \omega_0)$ компоненты v_i его коэффициентов определяются соотношениями:

$$v_1 = \frac{1}{\sin(\pi/2n)}, v_i = \frac{v_{i-1} \cos((i-1)\pi/2n)}{\sin(i\pi/2n)}, (i = \overline{1, n-1}), v_n = 1.$$

Проведем исследование системы для подтверждения полученных теоретических результатов.

1. Технические требования к показателям качества: $\sigma_\delta = 0\%$, $t_{П\delta} \leq 0,63$ с, $D_{1\delta} \geq 50$ с⁻¹.

2. Аналитическое представление передаточной функции НТО: $W_{ТО}(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)s}$.

3. В силу того что $\sigma_\delta = 0\%$, используется биномиальное распределение Ньютона корней полинома передаточной функции ТПДМ со степенью знаменателя, равной степени полинома знаменателя передаточной функции ТО. Тогда передаточная функция ТПДМ [1, 3] проектируемой системы, параметризованная характеристической частотой ω_0 , имеет вид:

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

$$\Phi(s, \omega_0) = \frac{\omega_0^3}{s^3 + 3\omega_0 s^2 + 3\omega_0^2 s + \omega_0^3}.$$

$$4. \omega_0 = \max \left\{ \omega_0 = \arg(t_{II} \omega_0 = 0,63\omega_0 \leq 6,3) = 10, \omega_0 = \arg \left(D_1(\omega_0) = \frac{\omega_0}{n} \Big|_{n=3} \geq 50 \text{ c}^{-1} \right) = 150 \right\} = 150 \text{ c}^{-1}, \quad \text{что}$$

обеспечит переходным процессам сходимость со временем $t_{II} = 6,3/150 = 0,042 \text{ c}$.

$$5. W(s, \omega_0) = \frac{150^3}{(s^2 + 450s + 3 \cdot 150^2)s}.$$

$$6. W_{ПК}(s, \omega_0) = \frac{150^3 (s+1)(s+2)}{s^2 + 450s + 3 \cdot 150^2}.$$
 Относительная степень передаточной функции

$W_{ПК}(s, \omega_0)$ является неотрицательной, поэтому ПК физически реализуем.

7. Нелинейный элемент в цепи основной обратной связи $\hat{y} = f(y)$, при этом конкретный вид преобразовательной характеристики $f(y)$ зададим в процессе компьютерного эксперимента.

Включаем разработанный ПК с передаточной функцией $W_{ПК}(s, \omega_0)$ в состав схемы Смита (рис. 1) и проводим комплексное компьютерное исследование системы в среде *MATLAB* при ряде условий.

7.1. Нелинейный элемент в цепи основной обратной связи имеет преобразовательную характеристику: $\hat{y} = f(y) = \begin{cases} 0 \text{ при } |y| < y_d \\ (y - y_d) \text{ при } |y| \geq y_d \end{cases};$

7.2. Внешнее воздействие $g(t)$ задано в полиномиальном виде: $g(t) = g_0 + \dot{g}_0 t$, где $g_0 = 0,2$, $\dot{g}_0 = -2 \text{ c}^{-1}$.

Для большей достоверности полученных результатов проведем исследование для трех значений y_d зоны нечувствительности преобразовательной характеристики $f(y)$ в цепи основной обратной связи. Крайние значения y_d отличаются от первоначального $y_d = 0,5$ в пять раз соответственно в сторону уменьшения и увеличения. Результаты комплексного компьютерного исследования (рис. 2(a-в)) представлены в виде зависимостей внешнего воздействия $g(t)$, выхода $y(t)$, ошибки $\varepsilon(t)$ и сигнала обратной связи $\hat{y}(t)$. Из них видно, что длительность переходных процессов $t_{II} = 0,042 \text{ c} < t_{II\delta} = 0,63 \text{ c}$, перерегулирование

$$\sigma = \sigma_\delta = 0 \%, \quad \text{добротность по скорости} \quad D_1 = \frac{\dot{g}_0}{\varepsilon_{уст}} = \frac{-2 \text{ c}^{-1}}{-0,04} = 50 \text{ c}^{-1} \geq D_{1\delta} = 50 \text{ c}^{-1}$$

удовлетворяют предъявленным к системе требованиям. При этом кривые для случаев $y_d = 0,1$, $y_d = 0,5$, $y_d = 2,5$ входного воздействия $g(t)$, выхода $y(t)$ и ошибки $\varepsilon(t)$ системы оказались идентичными, а кривые сигнала обратной связи $\hat{y}(t)$ полностью соответствуют преобразовательной характеристике нелинейного звена с указанными зонами нечувствительности.

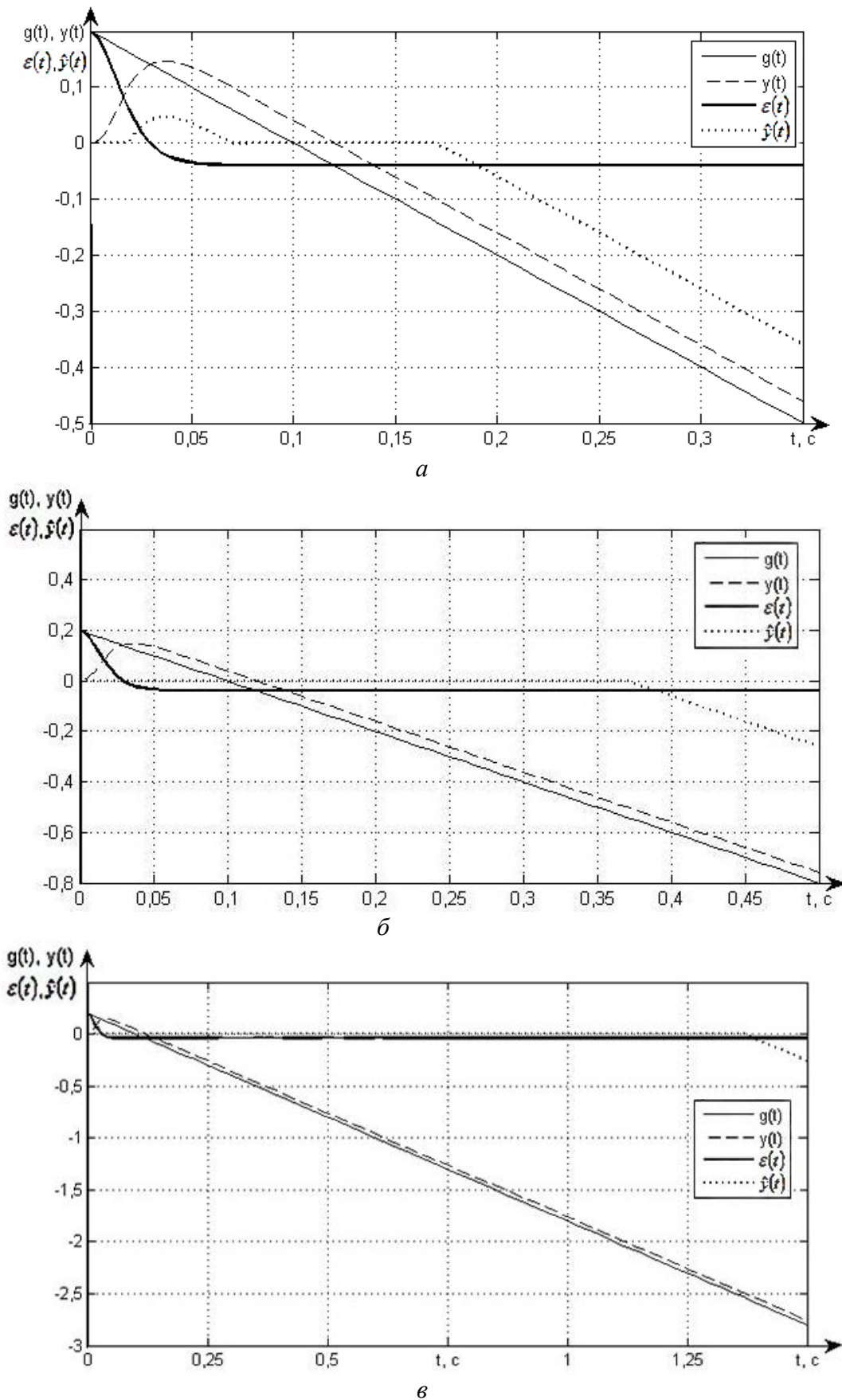


Рис. 2. Кривые внешнего воздействия, выхода, ошибки системы и сигнала обратной связи с последовательным компенсатором, включенным по модифицированной схеме Смита для значений: *a* – $y_d = 0,1$; *б* – $y_d = 0,5$; *в* – $y_d = 2,5$

8. В силу удовлетворения показателей качества спроектированной системы сформулированным требованиям в п. 1 с помощью процедуры *c2d* в среде *MATLAB* с интервалом дискретности: $\Delta t \leq \pi / \left(\frac{v_n}{\delta_y} \right)^{1/n} \omega_0 \Big|_{n=3, \omega_0=150, \delta_y=0,05} = 0.0078 \text{ с}$ осуществить переход

от непрерывного представления ПК с передаточной функцией $W_{ПК}(s, \omega_0)$ к его дискретному представлению $W_{ПК}(z, \omega_0)$ для программирования микроконтроллера управляющего устройства.

Предметом исследования является ситуация, которая возникает при включении непрерывного технического объекта в состав системы, основная обратная связь которой содержит нелинейное звено, порождаемое датчиком выходной переменной. Для решения задачи исключения влияния этого нелинейного элемента модифицирована базовая схема Смита включения последовательного компенсатора. Полученные теоретические результаты подтверждены комплексным компьютерным исследованием системы для случая объекта третьего порядка, которое показало, что процессы в предложенной системе нечувствительны к параметрам нелинейного элемента в цепи основной обратной связи, изменяющимся в ходе эксперимента в широком диапазоне.

Публикации

1. *Sinetova M.M. et al.* Approximation of advance element in consecutive compensator design for plant with control delay // 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Zadar, 2018. P. 90–95.
2. *Sinetova M.M. et al.* Dead-time pseudo-compensation for improvement of accurate characteristics of a continuous control system with correction according CP a Smith predictor // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2018. Vol. 54. No 1. P. 97–104.

Литература

1. *Синетова М.М. и др.* Аналитическое конструирование последовательного компенсатора для систем с запаздыванием на основе модификации типовых полиномиальных моделей // Труды СПИИРАН. 2017. Т. 52. № 3. С. 115–136.
2. *Vunder N.A., Ushakov A.V.* Sensitivity analysis of systems with a cascade compensator embedded in a Smith predictor to dead-time variation // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. Vol. 52. No 3. P. 274–279.
3. *Быстров С.В. и др.* Решение проблемы сигнальной неопределенности при аналитическом конструировании последовательного компенсатора в задаче управления пьезоприводом // Научно-технический вестник ИТМО. 2016. Т. 16. № 3. С. 451–459.



Сычева Елена Александровна
Факультет прикладной оптики
E-mail: easycheva@corp.ifmo.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНАРНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Е.А. Сычева

Научный руководитель – профессор В.В. Коротаев

Проект посвящен исследованию в области создания оптико-электронных комплексов непрерывного контроля инженерных и строительных сооружений. Рассмотрены подходы к построению каналов комплексов. Проанализированы основные факторы, влияющие на процесс измерения линейных смещений элементов конструкций. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность предложенного подхода к контролю линейных смещений и анализу информации в измерительных каналах комплекса.

Цель работы – исследование и разработка многоканального оптико-электронного комплекса для контроля линейных перемещений (МОЭК КЛП) конструктивных элементов планарных инженерных и строительных сооружений, позволяющего осуществлять непрерывный контроль смещения точек поверхности от номинальных значений в изменяющихся условиях эксплуатации.

Задачи работы:

- теоретический анализ подходов к построению структуры МОЭК КЛП на основе рационального сочетания аппаратных и программных средств;
- разработка алгоритмов обработки информации о координатах марок в каналах МОЭК КЛП;
- исследование характеристик обнаружения активных марок в реальных условиях эксплуатации;
- анализ и оценка степени влияния основных источников погрешностей в каналах МОЭК КЛП и нахождение путей ослабления этого влияния на результаты контроля;
- экспериментальные исследования характеристик опытных образцов блоков МОЭК КЛП.

Осуществление непрерывного контроля над техническим состоянием строительных сооружений и конструкций является актуальной задачей.

Наибольший практический интерес в решении задачи технического контроля состояния объектов представляет определение смещений элементов поверхности от заданной плоскости. При контроле крупногабаритных промышленных объектов следует учитывать достаточно сложные условия их эксплуатации и сильное воздействие внешних факторов [1]. Существующие на данный момент системы и методы не всегда в полной мере предоставляют возможность обеспечить необходимые требования одновременного контроля большого количества точек поверхности, либо очень сложны и дороги в реализации.

Анализ оптических и оптико-электронных методов и средств контроля перемещений элементов инженерных и строительных сооружений показал, что при контроле взаимного

расположения элементов конструкции эффективным и точным является метод полного (общего) створа, а при контроле прямолинейности и плоскостности поверхности – использование пошагового метода, позволяющего с высокой точностью определять отклонения от заданной прямой или плоскости [2, 3]. Поэтому при создании современных систем контроля перемещения полагается целесообразным использовать сочетание рассмотренных методов.

В работе предложена обобщенная структура универсального МОЭК КЛП, которая реализует модульный принцип построения и состоит из конечного количества измерительных каналов (КИ), где на основе обработки информации в базовых блоках (ББ) от реперных и контрольных марок (РМ и КМ) представляется информация о текущем состоянии объекта.

Предложена схема контроля линейных перемещений элементов планарных инженерных и строительных сооружений при параллельном расположении измерительных каналов с сопряженными по концам створа встречными оптико-электронными системами (рис. 1а). По координатам отображений РМ и КМ определяется их положение относительно сформированной опорной плоскости, которая получается путем координатной привязки базовых плоскостей соседних измерительных каналов по смежным контрольным маркам, попадающим в поле зрения смежных каналов. Привязка плоскостей соседних каналов осуществляется последовательно от краев контролируемой поверхности к ее центру путем нахождения матричного преобразования H , которое связывает множество координат точек в системах координат соседних каналов $P^5 = HP^6$ (рис. 1а).

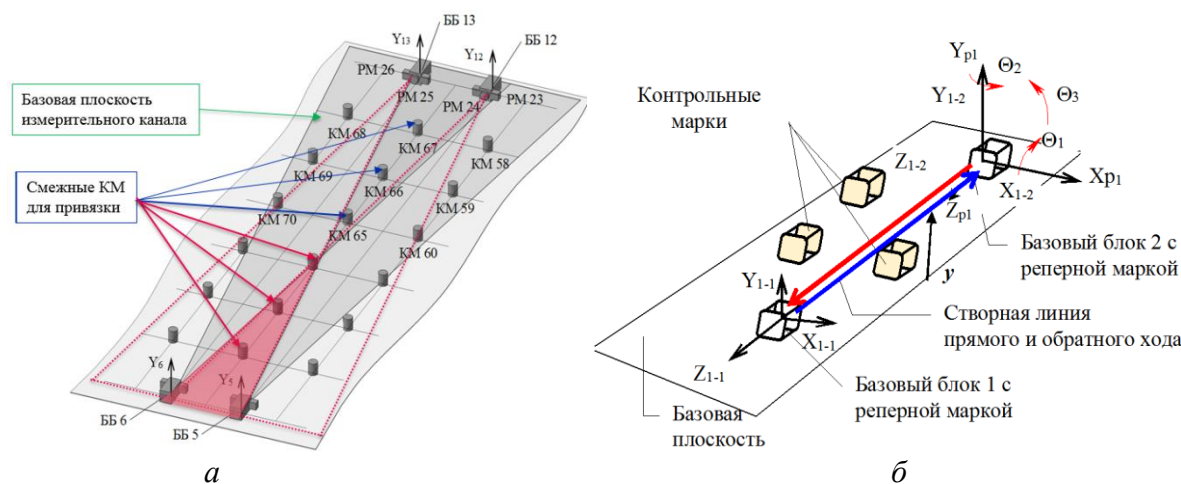


Рис. 1. а – сопряжение систем координат по смежным КМ и РМ соседних каналов для формирования опорной плоскости; б – структура оптического канала в МОЭК КЛП

Формирование опорной плоскости, относительно которой измеряются отклонения КМ, выполняется на основе полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов. Отклонение положения j -й КМ от опорной плоскости задается выражением:

$$\Delta y_j = \Phi(x_j, z_j) - y_j,$$

где $\Phi(x, z) = \sum_{m,n=0}^M a_{mn} x^m z^n + c$ – полиномиальная функция двух переменных степени M для поверхности, заданной функцией $y = f(x, z)$.

Структура оптического канала МОЭК КЛП (рис. 1б) в соответствии с предложенной схемой реализует полностворную схему контроля положения марок, ее особенностью является расположение ББ на краях контролируемого объекта совместно с РМ и совмещении линий прямого и обратного створов, что позволяет обеспечивать условие инвариантности к разворотам блоков. Для этого случая предложена формула вычисления координат y_i

контрольных марок в измерительном канале МОЭК КЛП:

$$y_i = \frac{z_i f^{1.2} (z_0 - f^{1.1}) y_i^{1.1} + (z_0 - z_i) f^{1.1} (z_0 - f^{1.2}) y_i^{1.2}}{2z_0 f^{1.1} f^{1.2}},$$

где $f^{1.1}$ и $f^{1.2}$ – задние фокусные расстояния объективов ББ^{1.1} и ББ^{1.2} соответственно, $y_i^{1.1}$ и $y_i^{1.2}$ – величины нестворности, измеренные в ББ^{1.1} и ББ^{1.2} измерительного канала, z_0 – расстояние между базовыми блоками, z_i – расстояние до марки.

Сравнительный анализ погрешности определения координат смещения марки при использовании одного или двух базовых блоков показал, что, применяя в полностворном методе алгоритмы обработки положения марок двумя базовыми блоками, можно повысить точность контроля положения марок после половины дистанции почти в 1,5 раза и при этом обеспечить нечувствительность к разворотам базовых блоков.

Реперные и контрольные марки являются в канале активными элементами и представляют собой набор полупроводниковых излучающих диодов, расположенных в вершинах геометрических фигур, таких как отрезок, равносторонний и равнобедренный треугольник и квадрат.

Исследования на компьютерной модели вероятности обнаружения активных структурированных марок на случайном неоднородном фоне показали, что при изменении значений отношения сигнал/шум, размере ПИД 4 мм, разрядности АЦП 8, максимальной яркости ПИД, вероятность правильного обнаружения марки на случайном неоднородном фоне практически одинакова для структур в виде равностороннего и равнобедренного треугольников и квадрата. При этом погрешность определения координат марки от величины отношения сигнал/шум меньше во всем диапазоне для марки в виде равностороннего треугольника и не превышает 0,3 чувствительного элемента при отношении сигнал/шум более 45 дБ (рис. 2).

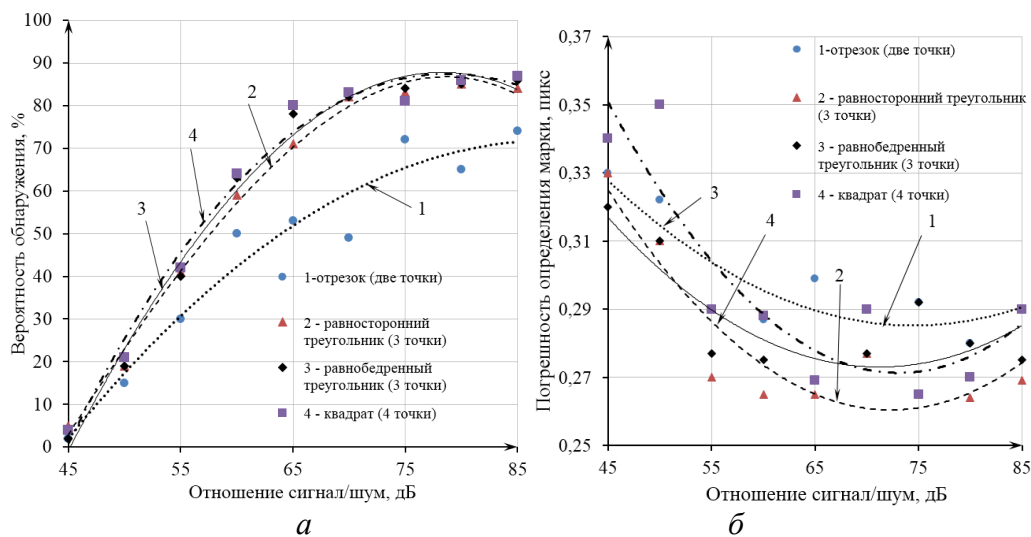


Рис. 2. Зависимости вероятности правильного обнаружения структурированных марок (а) и погрешности определения координат марок от отношения сигнал/шум (б)

При работе комплекса в реальных условиях существенное влияние на результаты оказывает вертикальный градиент температуры воздушного тракта [1].

Теоретические исследования показали, что использование дисперсионного метода, основанного на первичной обработке результатов контроля перемещений в длинноволновом диапазоне излучения с последующей корректировкой результатов по измерениям в более коротковолновом диапазоне, позволяет обеспечивать минимальную величину неисключенной

составляющей погрешности контроля смещений марки при компенсации воздействия вертикального градиента температуры.

Анализ составляющих суммарной неисключенной погрешности от воздействия вертикального градиента температуры (рис. 3), показал, что наибольший вклад вносят погрешности от неточности задания фокусного расстояния объектива ББ (3) и неточности определения дистанции δz до контролируемого объекта (1). Погрешности контроля величины дистанции до ББ (2) и задания показателя преломления (4, 5) для выбранных длин волн составляют не более 4 %.

Экспериментальные исследования на сформированном стенде подтвердили практическую реализуемость применения дисперсионного метода для компенсации воздействия вертикального градиента температуры в каналах МОЭК КЛП для определения смещения марки по ее отображению на современных видеокамерах.

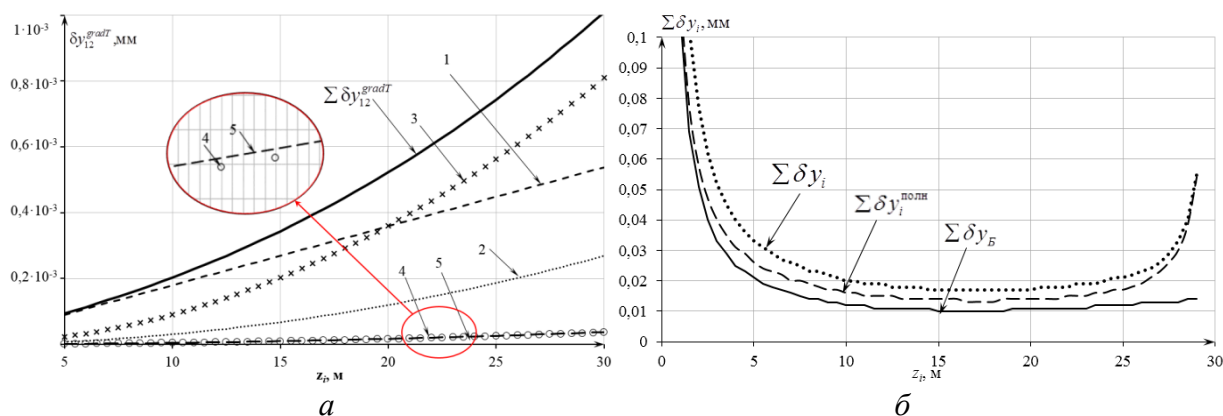


Рис. 3. а – зависимости теоретической оценки СКО неисключенной погрешности от воздействия вертикального градиента температуры $\Sigma \delta y_{12}^{gradT}$ и ее составляющих от дистанции z_i до КМ, (при $z_0 = 30$ м, $f' = 100$ мм, $\lambda_1 = 0,462$ мкм, $\lambda_2 = 0,630$ мкм) б – графики суммарной величины погрешности измерения положения i -ой КМ $\Sigma \delta y_i$ от дистанции до КМ

Теоретические исследования составляющих погрешностей определения координат КМ показали, что в канале МОЭК КЛП в прямом и обратном ходе суммарная погрешность контроля смещения i -й КМ $\Sigma \delta y_i$ (рис. 3б) определяется погрешностью текущего положения ББ измерительного канала $\Sigma \delta y_Б$ и, собственно, погрешностью измерения положения i -й КМ $\Sigma \delta y_i^{полн}$. Минимальная величина погрешности при этом наблюдается в середине дистанции.

Экспериментальные исследования проводились на сформированном стенде (рис. 4а). Полученные результаты согласуются с теоретическими исследованиями и подтверждают теоретический характер распределения погрешности по дистанции (рис. 4б) и минимальную величину погрешности близко к ее середине.

Результаты работы

Предложен новый подход к решению задачи определения линейных смещений управляемых элементов планарных инженерных конструкций с помощью совместной обработки координат отображений активных марок встречно ориентированными оптико-электронными системами, сопряженными по концам створа, и компенсацией воздействия вертикального градиента температуры воздушного тракта, что позволяет расширить диапазон измерений смещений и уменьшить их погрешность.

Определено условие инвариантности преобразований сигналов при разворотах блоков, вызванных деформациями поверхности.

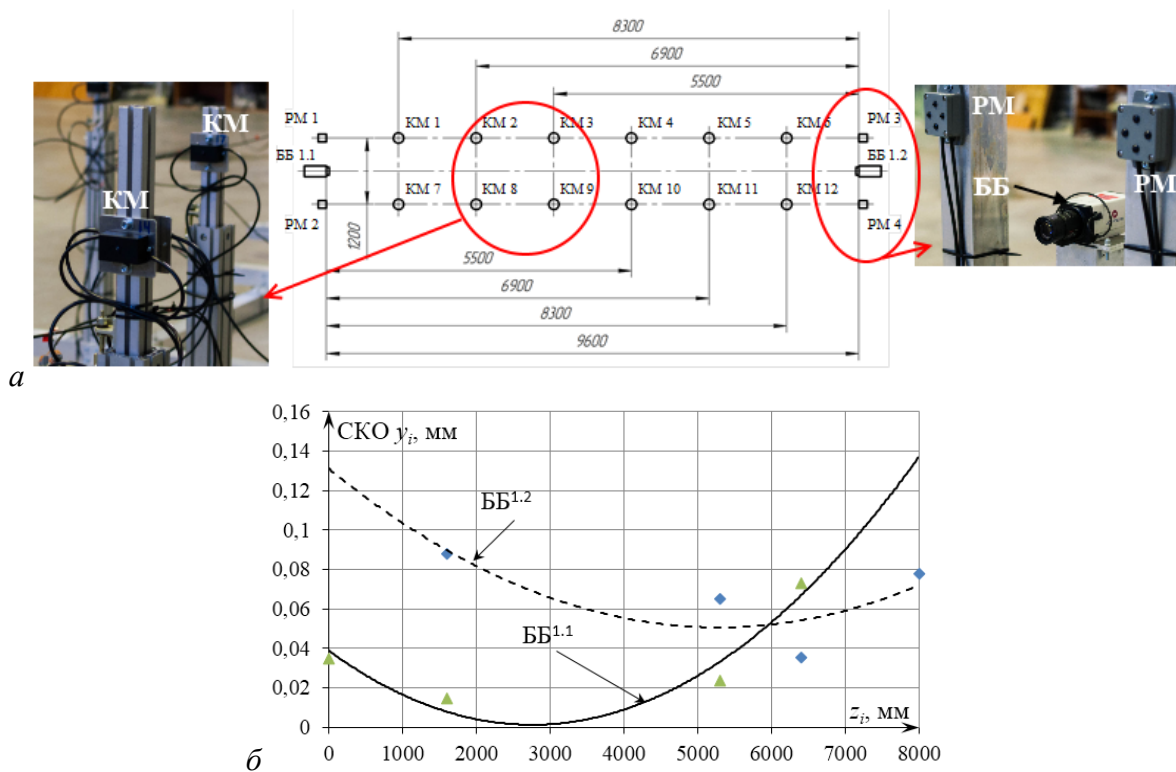


Рис. 4. а – схема размещения элементов канала МОЭК КЛП на стенде;
 б – экспериментальная оценка СКО определения координат KM_1-KM_7 , $BB_{1.1}$ и KM_8-KM_{12} , $BB_{1.2}$ при обработке информации для створного метода в прямом и обратном ходе в соответствии с размещением марок на стенде

Разработан алгоритм координатной привязки комплекса параллельных каналов по сопряженным активным маркам.

Разработана компьютерная модель для оценки вероятности обнаружения структурированных активных марок на случайном неоднородном фоне.

Доказано, что использование дисперсионного метода, основанного на первичной обработке результатов контроля перемещений в длинноволновом диапазоне излучения с последующей корректировкой результатов по измерениям в более коротковолновом диапазоне длин волн, позволяет обеспечивать минимальную величину неисключенной составляющей погрешности контроля смещений марки при компенсации воздействия вертикального градиента температуры.

Разработан стенд для испытания технологических образцов МОЭК КЛП, позволяющий проводить экспериментальные исследования погрешностей при имитации смещений марок для различных условий эксплуатации каналов МОЭК КЛП.

Публикации

1. Сычева Е.А. и др. Выбор параметров оптико-электронных систем контроля смещений с активными реперными марками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2 (114). С. 205–211.
2. Сычева Е.А. и др. Компенсация погрешности определения пространственного положения реперных марок, вносимой воздушным трактом // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 4. С. 348–355.

Литература

1. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий. Новосибирск, 2003. – 356 с.

2. Ямбаев Х.К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве. М., 1986. – 264 с.
3. Шеховцов Г.А., Шеховцова Р.П. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография. Н. Новгород, 2014. – 256 с.



Титова Екатерина Сергеевна
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: kattitova@bk.ru

НАБЛЮДАТЕЛИ ПОТОКА, ПОЛОЖЕНИЯ И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Е.С. Титова

Научный руководитель – доцент О.В. Слита

В работе рассмотрено решение проблемы идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) при бездатчиковом управлении с целью разработки алгоритмов идентификации его параметров, имеющих простую структуру и быструю сходимость, позволяющих в дальнейшем при проектировании реальной системы управления повысить эффективность и минимизировать затраты на управление и реализацию ее на практике.

Цель работы – синтезировать бездатчиковое управление синхронным двигателем с постоянными магнитами для идентификации параметров двигателя.

Задачи:

- необходимо исследовать модели объекта управления – СДПМ;
- разработать адаптивный алгоритм идентификации параметров объекта управления;
- исследовать системы с синтезированными алгоритмами управления.

Современные системы управления СДПМ могут сильно отличаться друг от друга в зависимости от условий эксплуатации. Для управления ими необходима информация о механических координатах и физических параметрах двигателя в процессе его функционирования. Эти параметры, иногда заявленные производителем, зачастую сильно отличаются от фактических из-за влияния внешних факторов или механического износа системы в процессе работы, либо получены при помощи датчиков скорости и положения двигателя. Использование датчиков при проектировании системы является материально и физически затратным. В целях повышения качества системы разрабатываются алгоритмы бездатчикового управления, обеспечивающие быстродействие и точность определения параметров системы [1, 2]. В работе рассматривается простой по структуре алгоритм, основанный на разработке наблюдателей скорости и положения ротора в зависимости от изменения одного критерия качества функционирования системы – момента нагрузки, что значительно упрощает процедуру математических расчетов. Алгоритм обеспечивает быструю сходимость параметров системы и низкую колебательность переходного процесса.

В работе была рассмотрена классическая фиксированная модель ($\alpha\beta$) неявнополюсного СДПМ, представленная в [3]:

$$L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = -Ri_{\alpha\beta} - \lambda_m n_p \omega J_\alpha C_\alpha + v_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

$$J\dot{\omega} = \lambda_m n_p i_{\alpha\beta}^T J_\alpha C_\alpha - \tau_L - k_f \omega, \quad (2)$$

где $J_\alpha := \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $i_{\alpha\beta} = \text{col}(i_\alpha, i_\beta)$ и $v_{\alpha\beta} = \text{col}(v_\alpha, v_\beta)$ – ток статора и напряжение на клеммах двигателя соответственно, ω – скорость ротора, L – индуктивность статора, R – сопротивление статора, n_p – число пар полюсов, J – момент инерции (нормализованный с n_p), $k_f \geq 0$ – коэффициент вязкого трения, λ_m – постоянный поток, создаваемый постоянными магнитами, τ_L – момент нагрузки и $C_\alpha := \text{col}(\cos(n_p \theta), \sin(n_p \theta))$.

Конструкция наблюдателя скорости

При проектировании наблюдателя скорости ротора использовались следующие допущения:

- момент нагрузки τ_L известен или может быть измерен;
- индуктивность статора L , сопротивление обмоток статора R , инерция ротора J , число пар полюсов n_p и коэффициент вязкого трения k_f известны.

Конструкция наблюдателя скорости для $\tau_L \equiv \mathbf{0}$. На основании преобразования уравнений (1) и (2) и $\tau_L \equiv \mathbf{0}$ получаем:

$$Li_{\alpha\beta}^T \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = -Ri_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} - \omega(J\dot{\omega} + k_f \omega) + i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta}, \quad (3)$$

затем вводим две переменные:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{1}{2} i_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta}, \\ q_2 = \frac{1}{2} \omega^2. \end{cases} \quad (4)$$

Тогда уравнение (3) можно переписать в виде:

$$L\dot{q}_1 + 2Rq_1 = -J\dot{q}_2 - 2k_f q_2 + i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta}, \quad (5)$$

а теперь рассмотрим фильтр $H(s) = \frac{1}{J_s + 2k_f}$.

Из уравнения (5) получаем:

$$q_2 = H(s)([i_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta}] - 2R[q_1]) - LsH(s)[q_1], \quad (6)$$

где $sH(s) = \frac{s}{J_s + 2k_f}$.

Затем из выражения (4) находим q_2 и ω .

Конструкция наблюдателя скорости для известной постоянной величины момента нагрузки τ_L . Из формул (1) и (2) при условии, что τ_L – известная постоянная величина, получаем выражение:

$$Li_{\alpha\beta}^T \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = -Ri_{\alpha\beta}^T i_{\alpha\beta} - \omega(J\dot{\omega} + \tau_L + k_f \omega) + i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta}. \quad (7)$$

Применим две переменные (4). Тогда выражение (7) можно переписать в виде:

$$L\dot{q}_1 + 2Rq_1 + J\dot{q}_2 + 2k_f q_2 = i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta} - \tau_L \omega. \quad (8)$$

С помощью выражения (8) находим переменную q_2 :

$$q_2 = \frac{1}{J_s + 2k_f} (i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta} - \tau_L \omega) - \frac{L_s + 2R}{J_s + 2k_f} q_1. \quad (9)$$

Представим уравнение (9) в компактной форме:

$$q_2 = -kH(s)\sqrt{2q_2} + \zeta, \quad (10)$$

где $k = \tau_L$, $H(s) = \frac{1}{J_s + 2k_f}$ и $\zeta = \frac{1}{J_s + 2k_f} i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta} - \frac{L_s + 2R}{J_s + 2k_f} q_1$.

Конструкция наблюдателя скорости для известного и изменяющегося со временем момента нагрузки τ_L . На основании формул (1) и (2) при условии, что τ_L – известная и изменяющаяся со временем величина, получаем выражение, аналогичное (8), из которого можно найти:

$$q_2 = \frac{1}{J_s + 2k_f} (i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta} - \tau_L \omega) - \frac{L_s + 2R}{J_s + 2k_f} q_1. \quad (11)$$

Перепишем (11) в компактной форме:

$$q_2 = -H(s)\tau_L\sqrt{2q_2} + \zeta, \quad (12)$$

где $H(s) = \frac{1}{J_s + 2k_f}$ и $\zeta = \frac{1}{J_s + 2k_f} i_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta} - \frac{L_s + 2R}{J_s + 2k_f} q_1$.

Конструкция наблюдателя положения ротора для известного и изменяющегося со временем момента нагрузки τ_L

Предположим, что скорость ротора ω известна.

Классическая фиксированная модель $(\alpha\beta)$ СДПМ представлена в виде:

$$\lambda = v_{\alpha\beta} - Ri_{\alpha\beta}, \quad (13)$$

где $\lambda \in R^2$ – постоянный поток.

Для СДПМ постоянный поток представлен в виде:

$$\lambda = Li + \lambda_m C_a, \quad (14)$$

Уравнение (13) может быть переписано [4]:

$$\lambda = \eta + z_1 - Rz_2, \quad (15)$$

где $z_1 = \frac{1}{p} v_{\alpha\beta}$, $z_2 = \frac{1}{p} i_{\alpha\beta}$, или $z_1 = \int_0^t v_{\alpha\beta} ds$, $z_2 = \int_0^t i_{\alpha\beta} ds$, а p – дифференцированный оператор

и $\eta = [\eta_1 \eta_2]^T$ – вектор неизвестных постоянных параметров.

Для оценки неизвестного параметра γ был использован следующий алгоритм:

$$\dot{\hat{\gamma}} = \gamma_a (g_2^2 \hat{\gamma} + g_1 g_2), \quad (16)$$

где γ_a – положительная константа.

Тогда для оценки полного потока получаем выражение:

$$\hat{\lambda} = z_1 - Rz_2 - \hat{\eta}, \quad (17)$$

где

$$\hat{\eta} = -n_p^{-1} J_a^{-1} \hat{\gamma}. \quad (18)$$

Теперь возможно оценить положение ротора СДПМ. Из (13) получаем:

$$C_a = \frac{\hat{\lambda} - Li_{\alpha\beta}}{\lambda_m}. \quad (19)$$

Из выражения (19) получаем:

$$\begin{aligned} \cos(n_p \Theta) &= \lambda_m^{-1} (\hat{\lambda} - Li_{\alpha\beta}), \\ \hat{\Theta} &= n_p^{-1} \arccos(\lambda_m^{-1} (\hat{\lambda} - Li_{\alpha\beta})). \end{aligned} \quad (20)$$

Если скорость ротора известна, то для определения неизвестных параметров СДМП (суммарный поток и положение ротора) используются выражения (16)–(20). Если скорость ротора неизвестна, используются выражения (16)–(20), где ω заменяется на $\hat{\omega}$.

Результаты моделирования

Для моделирования используются параметры двигателя *VMP0701F*, как и в [5]. Параметры СДПМ приведены в Таблице.

Таблица
Параметры СДПМ *VMP0701F*

| Параметры (единицы) | Значение |
|--|---------------------|
| Индуктивность L (мГн) | 40,03 |
| Сопротивление (Ом) | 8,875 |
| Инерция привода J (кг·м ²) | 60·10 ⁻⁶ |
| Пары полюсов n_p (-) | 5 |
| Магнитный поток (Вб) | 0,2086 |

Результаты моделирования наблюдателя положения ротора при различных параметрах момента нагрузки представлены на рис. 1–4.

В работе была рассмотрена проблема оценки скорости ротора, общего потока и положения ротора для СДПМ. Предполагается, что известны следующие параметры двигателя: сопротивление обмотки статора, индуктивность статора, инерция ротора, количество пар полюсов, коэффициент вязкого трения и момент нагрузки. Представлены наблюдатели скорости для разного состояния момента нагрузки, потока и положения. Их конструкция осуществлялась с использованием линейной фильтрации известных сигналов. Конструкция наблюдателей положения и потока основана на репараметризации классической модели СДПМ. Оценка скорости ротора используется для оценки положения и потока. Предлагаемые алгоритмы имеют простую структуру и быструю сходимость параметров системы.

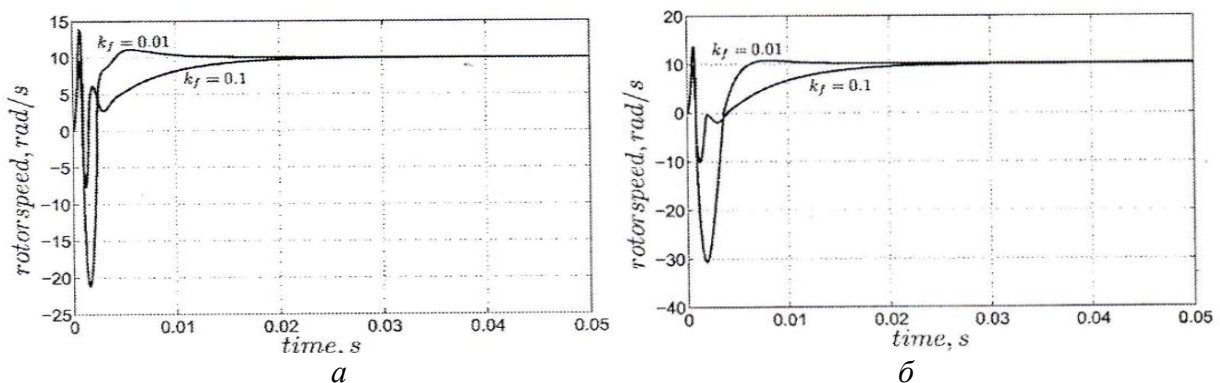


Рис. 1. Оценка скорости ротора $\hat{\omega}$ при эталонной скорости $\omega = 10$ рад/с и моменте нагрузки: а – $\tau_L = 1$; б – $\tau_L = 1 + \sin(10t)$

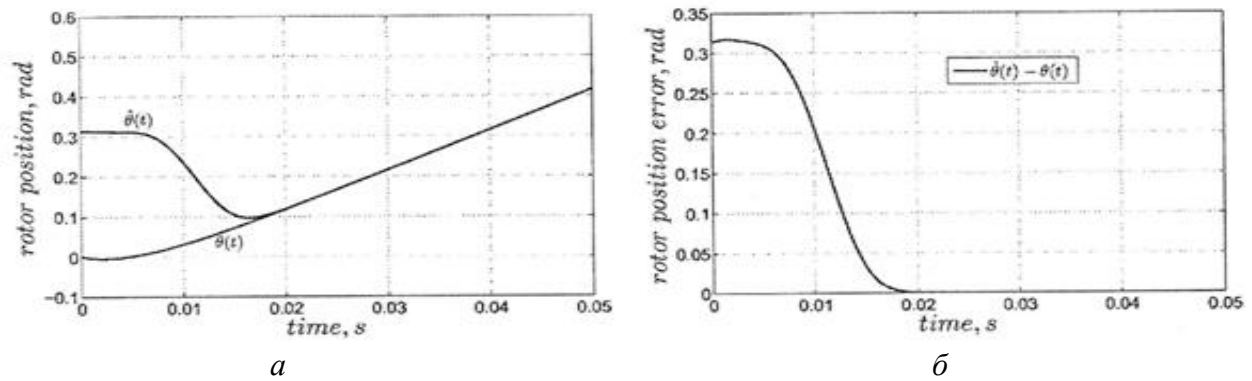


Рис. 2. а – оценка положения ротора при эталонной скорости $\omega = 10$ рад/с, моменте нагрузки $\tau_L = 1$ и коэффициенте вязкого трения $k_f = 0,1$; б – ошибка

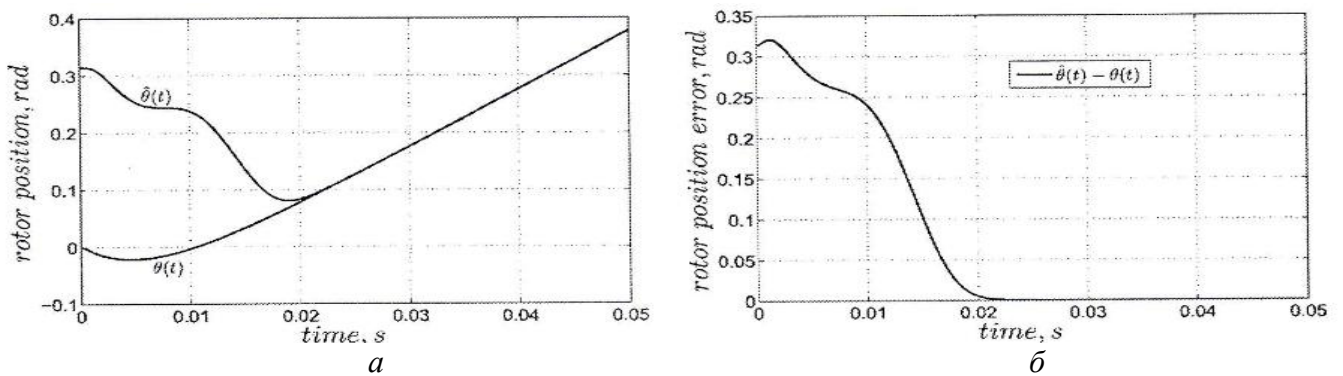


Рис. 3. а – оценка положения ротора при эталонной скорости $\omega = 10$ рад/с, моменте нагрузки $\tau_L = 1 + \sin(10t)$ и коэффициенте вязкого трения $k_f = 0,1$; б – ошибка

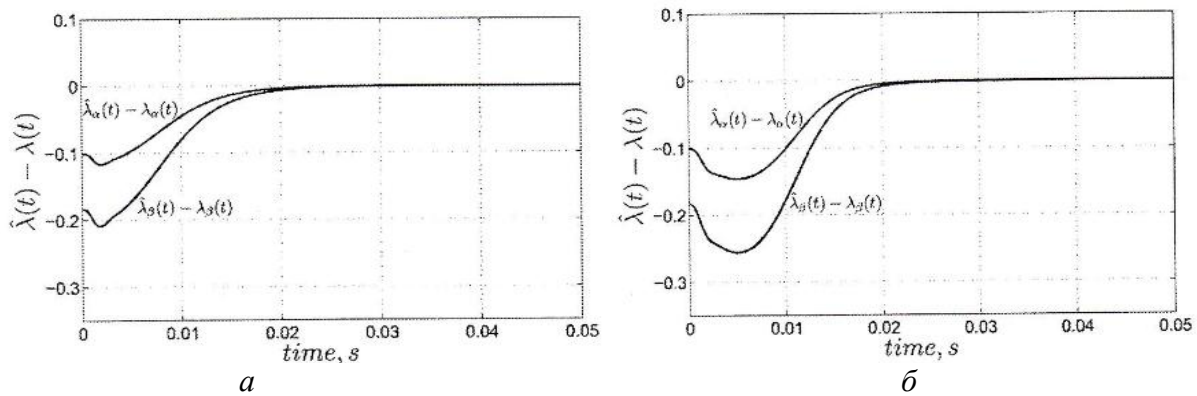


Рис. 4. Ошибка при оценке момента нагрузки, эталонная скорость $\omega = 10$ рад/с, коэффициенте вязкого трения $k_f = 0,1$ и моменте нагрузки: а – $\tau_L = 1$; б – $\tau_L = 1 + \sin(10t)$

Публикации

1. Titova Y.S. et al. Rotor position, speed and flux observers for permanent magnet synchronous motors [Electronic resource] // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2018. Vol. 19. No 2. P. 75–79. URL: <http://www.novtex.ru/mech/mech2018/annot02.html#1> (accessed: 01.11.2017.)
2. Titova Y.S. et al. Simple speed observer for PMSM [Electronic resource] // 9th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). Munich, 2017. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8255148/> (accessed: 15.01.2018).

Литература

1. *Acarnley P.P., Watson J.F.* Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2006. Vol. 53. No 2. P. 352–362.
2. *Nam K.H.* AC motor control and electric vehicle applications. CRC Press, 2010. – 449 p.
3. *Chiasson J.* Modeling and high-performance control of electric machines. Wiley, 2005. – 709 p.
4. *Bobtsov A.A. et al.* A new approach for estimation of electrical parameters and flux observation of permanent magnet synchronous motors // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2016. Vol. 30. P. 1434–1448.
5. BMP synchronous motor manual. V1.00. Schneider Electric, 2012. – 78 p.



Фролова Марина Алексеевна
Факультет прикладной оптики
E-mail: marrain6@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ- ПРОЕКТОРОВ ФРЕНЕЛЯ

М.А. Фролова

Научный руководитель – профессор С.Н. Корешев

Приведены результаты исследования влияния распределения фазы в пространстве предметов на глубину резкости синтезированных голограмм. Работа выполнена методом математического моделирования реальных физических процессов синтеза и восстановления голограмм бинарных транспарантов. Установлена возможность существенного (в несколько раз) увеличения глубины резкости восстановленного изображения за счет представления объектной волны при синтезе голограммы в виде суперпозиции объектных волн, исходящих от двух одинаковых объектов, расположенных на различных строго фиксированных расстояниях от плоскости синтеза голограммы.

Цель проекта – разработка метода увеличения глубины резкости изображений, формируемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля.

Задачи:

– расчет распределения комплексной амплитуды и интенсивности в трехмерной фигуре рассеяния, формируемой оптической системой при осевом расположении точечного объекта;

– экспериментальное исследование способов увеличения глубины резкости изображений, формируемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля.

В настоящее время существует несколько подходов к количественной оценке глубины резкости оптической системы. Так, например, в традиционной оптике принято под глубиной резкости понимать такое смещение плоскости наблюдения изображения, при котором изображение точечного объекта, представляемое в виде геометрической точки, размоется в круг с диаметром, равным диаметру центрального кружка картины Эйри. Формула,

позволяющая определить глубину резкости оптической системы в соответствии с этим критерием [1], имеет вид:

$$|b| = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}, \quad (1)$$

где A – числовая апертура системы, λ – длина волны используемого излучения и n – показатель преломления среды (в случае воздуха $n = 1$).

В свою очередь, числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры объекта – пикселе, имеющем размер a_i , будет описываться выражением:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_i}, \quad (2)$$

где α – апертурный угол дифрагировавшего излучения.

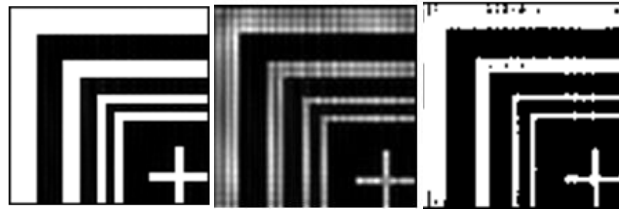
Из выражений (2) и (3) следует, что единственными параметрами, влияющими на глубину резкости, являются рабочая длина волны λ и размер одного пиксела a_i . В настоящее время известны различные методы, позволяющие дополнительно увеличить глубину резкости изображений. Один из них основан на представлении при синтезе голограммы-проектора объектной волны в виде суперпозиции нескольких объектных волн, порожденных одним и тем же объектом – фотошаблоном, располагаемым на различных расстояниях от голограммы [2].

Практическая реализация синтеза подобной голограммы, как указывалось выше, требует представления объектного пучка в виде суперпозиции двух или более объектных волн, формируемых одинаковыми объектами. При физической регистрации голограммы такая операция требовала бы очень точной установки объектов, но ее нетрудно реализовать при условии синтеза в виртуальном пространстве. Наличие расстояния между плоскими объектами приводит к возникновению определенной разности фаз между объектными волнами, которая, очевидно, будет влиять на регистрируемую голограммную структуру, а через нее – на итоговое распределение интенсивности в восстановленном изображении и, соответственно, глубину резкости. При этом восстановленное изображение будет иметь наилучшее качество при достижении полной синфазности объектных пучков.

Данная оценка практически полностью соответствует приведенным в работе [3] результатам расчета распределения фазы в восстанавливаемом изображении. Из нее следует, что при небольших значениях расстояния между объектами Δ главным, влияющим на распределение фазы в плоскости синтеза голограммы, фактором становится положение точки на голограмме относительно ее оси. В то же время по мере увеличения Δ влияние положения точки постепенно падает и основным фактором, от которого зависит разность фаз, становится само расстояние между источниками света.

Другим не менее значимым фактором является сама дискретизация. Ограниченный размер дискретных ячеек плоскости голограммы приводит к тому, что значение комплексной амплитуды, рассчитанное в конкретной точке, фактически устанавливается сразу для всего пиксела. Это влечет за собой неопределенность и, как следствие, рост различия между регистрируемыми значениями фазы и комплексной амплитуды и реального значения по мере смещения относительно центра пиксела к его границам. Отметим, что смещение на один пространственный период приводит к набегу фазы восстановленного изображения в 2π . Резкая смена значений фазы и амплитуды происходит уже по мере перехода границы между соседними пикселями.

Продемонстрировать зависимость расстояния между плоскостями объектов от качества восстановленного изображения можно с помощью эксперимента, для выполнения которого использовался упомянутый выше программный комплекс. Экспериментальная оценка включала синтез полутонных голограмм-проекторов особого тестового объекта, названного «уголки». Вид исходного объекта приведен на рис. 1.



а б в

Рис. 1. Изображения тестового объекта: а – исходное; восстановленные с помощью синтезированной голограммы: б – до пороговой обработки; в – после

Тестовый объект характеризовался размером линий креста 1×7 пикселей. Два ближайших к кресту уголка были составлены из отрезков толщиной 1 пиксел, расстояние между ними также было равно 1 пикселу. Далее следовал промежуток шириной в 2 пиксела, за которым располагался третий уголок, ширина которого составляла 2 пиксела. Ширина четвертого уголка была равна 3 пикселям. Общий размер объекта, таким образом, составлял 23×23 пиксела.

Параметры синтеза были выбраны в соответствии с условиями, определенными в работе [4], и в целом совпадают с параметрами, используемыми в предыдущем эксперименте. То есть размер минимального элемента объекта a_t составлял 80×80 нм, размер пикселей плоскостей объекта и голограммы d_d – 20×20 нм, а рабочая длина волны λ – 13,5 нм. При таких условиях угол падения опорного пучка α должен быть равен $14,67^\circ$, а расстояние между голограммой и плоскостью ближайшего к ней объекта должно составлять не менее 20345 нм. Поскольку речь идет о достаточно сложном по структуре объекте, то в целях избавления от дополнительных помех, связанных с интерференцией нулевого и первого порядков дифракции голограммы, оно было увеличено в два раза и составило: $R_h = 40690$ нм. Глубина резкости восстановленного изображения при указанных параметрах, в соответствии с формулой (3), должна быть равна $b = \pm 237$ нм. Вторая плоскость объекта ставилась чуть дальше от голограммы на некотором расстоянии Δ относительно первой, изменяющемся в процессе эксперимента.

На рис. 2 представлен график зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки изображения, полученного в плоскости наилучшей установки на расстоянии R_h , отнесенных к максимальному числу градаций, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы, от расстояния между плоскостями двух объектов Δ . Фактически можно говорить о зависимости качества изображения от расстояния Δ .

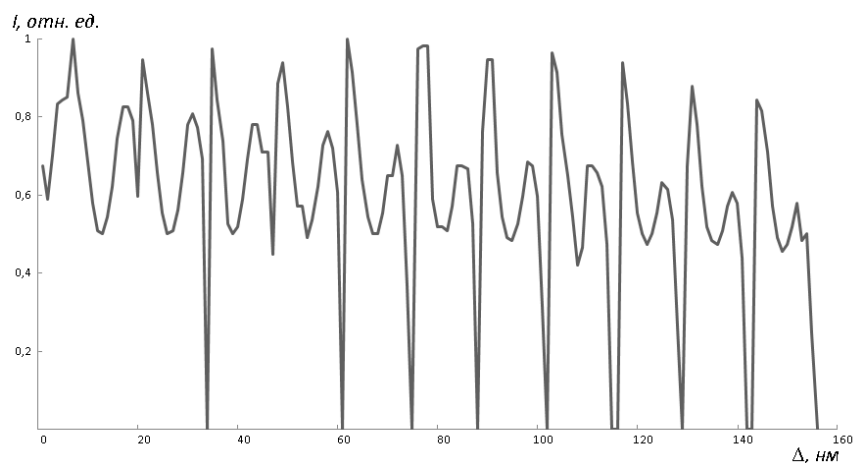


Рис. 2. График зависимости качества изображения тестового объекта, полученного в плоскости наилучшей установки, от расстояния Δ между плоскостями объектов при синтезе

На графике хорошо заметно, что, пока значение Δ остается достаточно небольшим (в пределах нескольких длин волн), качество изображения в целом не сильно зависит от Δ . Исключение составляют отдельные максимумы, соответствующие изображениям объекта с более высоким качеством, характерные для расстояний, при которых зарегистрированные объектные волны в процессе синтеза оказываются синфазными. В свою очередь, минимумы на графике соответствуют тем расстояниям, на которых фаза объектных волн оказывается противоположной.

По мере увеличения Δ значения минимумов приближаются к нулю: влияние апертуры уже не может компенсировать нарушение синфазности, в результате чего восстановление качественного изображения с помощью таких голограмм становится практически невозможным. В то же время синфазная запись объектных волн при отсутствии влияния апертуры позволяет значительно улучшить качество изображения. Описанная выше «неопределенность фазы при синтезе голограммы» приводит к появлению резких переходов между соседними минимумом и максимумом вследствие резких изменений значений фазы.

При больших значениях расстояния Δ , близких к b , влияние апертуры голограммы практически пропадает: качество изображения в среднем заметно ниже, за исключением отдельных максимумов, возникающих при синфазной записи за счет влияния дискретизации.

Расстояние между соседними максимумами соответствует рабочей длине волны λ . Таким образом, проверка ряда значений при сдвиге в пределах длины волны позволяет точно определить положение максимума.

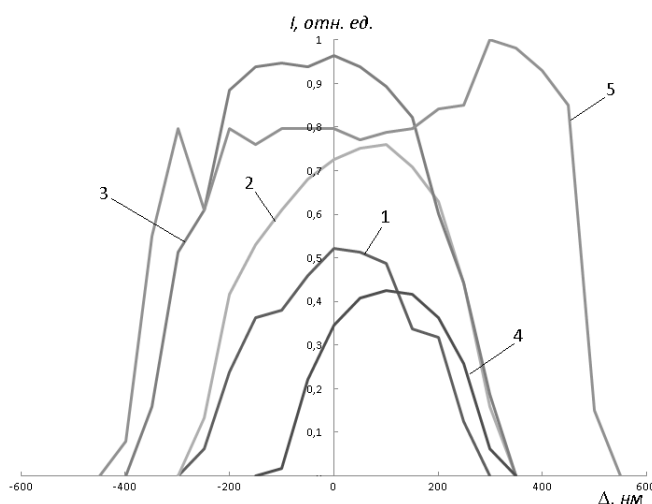


Рис. 3. Графики зависимости качества восстановленного изображения тестового объекта от дефокусировки при различных значениях расстояния Δ между плоскостями объектов при синтезе: 1 – без установки второй плоскости; 2 – $\Delta = 4$; 3 – $\Delta = 21$; 4 – $\Delta = 195$; 5 – $\Delta = 199$ нм

Для непосредственной оценки глубины резкости изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при некоторых заданных значениях Δ , был восстановлен ряд изображений на расстояниях δ , отличающихся от расстояния R_h на значения от -1000 до 1000 нм с шагом 50 нм. Результаты исследования качества изображений в количестве градаций, нормированном по их максимальному числу, приведены на рис. 3.

Таким образом, установлено, что добавление второй плоскости объекта при условии совпадения фазы объектных волн позволяет увеличить не только глубину резкости, но и общее качество изображений (максимальное количество градаций). Наилучшее качество восстановленных изображений достигается при установке второй плоскости объекта на расстояниях, близких к значению предельной глубины резкости b , при этом глубина резкости изображения увеличивается в 2–3 раза.

В результате применения данного метода был установлен характер зависимости качества изображения объекта, восстановленного с помощью голограммы, синтезированной при использовании двух плоских объектов, от расстояния между объектами. Характер данной зависимости не изменяется при сохранении основных параметров синтеза. В соответствии с этой зависимостью оптимальное по качеству восстановленного изображения значение расстояния будет определяться синфазностью объектных волн при синтезе и должно быть близким к предельному значению глубины резкости.

Публикации

1. Фролова М.А. и др. Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11. С. 50–57.
2. Фролова М.А. и др. Распределение комплексной амплитуды и интенсивности в трехмерной фигуре рассеяния, формируемой оптической системой при осевом расположении точечного объекта // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 3. С. 377–384.

Литература

1. Цуканова Г.И. и др. Прикладная оптика. Часть 2. Учебно-методическое пособие под редакцией профессора Шехонина А.А. СПб., 2003. – 73 с.
2. Фролова М.А. и др. Методы увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 12. С. 62–68.
3. Фролова М.А. и др. Распределение комплексной амплитуды и интенсивности в трехмерной фигуре рассеяния, формируемой оптической системой при осевом расположении точечного объекта // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 3. С. 377–384.



Ханжина Наталья Евгеньевна
Факультет информационных технологий и программирования
E-mail: nehanzhina@corp.ifmo.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СИМПТОМОВ АЛЛЕРГИИ НА ПЫЛЬЦУ

Н.Е. Ханжина

Научный руководитель – доцент А.А. Фильченков

Цель проекта – создать программное приложение для оценки концентрации пыльцы растений-аллергенов в воздухе, в котором задействовано автоматизированное определение видов растений по изображениям их пыльцевых зерен. Такая оценка сейчас осуществляется специалистами вручную. Внедрение этого приложения позволит сократить затраченные усилия и обеспечить больных своевременной информацией о качестве воздуха с целью предупреждения симптомов поллинозов и астмы.

Входными данными для приложения будут изображения пыльцевых зерен, полученные с помощью микроскопа, а результатом – отчет о пыльцевом спектре (составе воздуха

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

в процентном соотношении). Исходя из этого, можно выделить три основных задачи: детекция, распознавание пылевых зерен, составление отчета.

Первая задача – детекция, то есть предварительная обработка изображения, ее цель – получить отдельные изображения, каждое из которых содержит ровно одно пылевое зерно. Вторая задача – классификация, то есть отнесение пылевого зерна к какому-либо классу аллергенов (идентификация). Классы необходимо определить с точностью до вида растения. Последняя задача – подсчет. Он необходим для составления отчетной статистики по распознанной пыли, которая затем используется специалистами.

Пример изображения пробы воздуха из ловушки с пылью с оптического микроскопа приведен на рис. 1.

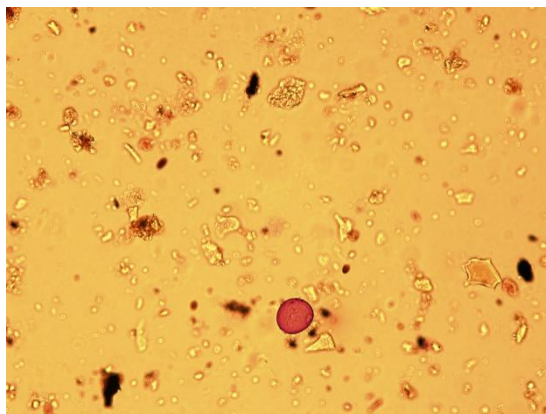


Рис. 1. Пример изображения, полученного с оптического микроскопа

Пылевое зерно злака, являющегося аллергеном, окрашено фуксином (розового цвета). Остальные объекты представляют собой мусор, который необходимо исключить из распознавания на первом этапе работы системы.

Иногда различные виды растений обладают схожей формой пылевых зерен, в то время как пылевые зерна одного вида, в зависимости от оси симметрии, могут выглядеть по-разному. В этом и заключается сложность их классификации (Табл. 1).









Рассмотрим процесс предобработки, или детекции. На предыдущем этапе исследования с этой целью использовался необучающийся алгоритм сегментации по водоразделам. Подход на его основе обеспечил 87,1 % точности. Новый подход предполагает применение глубокой нейронной сети для детекции объектов под названием *RetinaNet* [1], которая принадлежит семейству *R-CNN* [2]. Так, *RetinaNet* использует одну объединенную нейронную сеть, состоящую из основной сверточной сети и двух вспомогательных подсетей. Основная сеть представляет собой самостоятельную глубокую нейронную сеть, ответственную за извлечение карт признаков. Она построена поверх *ResNet50* [3]. Первая вспомогательная сеть, отвечающая за классификацию, выдает вероятность наличия объекта на каждом из A якорей для каждого из K классов. В ней содержится четыре сверточных слоя с ядром свертки размера три, а в качестве функции потерь используется *Focal loss*. Вторая вспомогательная сеть для регрессии прямоугольников имеет похожую структуру, но с использованием функции потерь *Smooth L₁*, и на выходе сети для каждого якоря получается четыре координаты.

Проблема нейронных сетей семейства *R-CNN* в том, что они генерируют огромное количество предположений о местонахождении объектов на изображении. Таким образом, есть вероятность появления большого количества фоновых прямоугольников, которые заставят классификатор акцентировать внимание на фоне изображения с целью уменьшения функции потерь. При этом прямоугольники, содержащие объекты интереса на изображении, окажут более слабое влияние. Функция потерь *Focal loss* позволяет увеличить влияние редких событий, а именно регионов интереса, с помощью коэффициента модуляции,

многократно уменьшая значение функции для хорошо классифицируемых объектов. Благодаря новой функции потерь *RetinaNet* не уступает по скорости предыдущим одноэтапным детекторам, а по точности превосходит двухэтапные. Поэтому данная модель была выбрана в качестве основного способа для детекции пыльцевых зерен.

Таблица 1

Примеры изображений разных видов растений из набора данных

| № | Виды аллергенов | Примеры изображений |
|---|---------------------|--|
| 1 | Ольха клейкая |  |
| 2 | Липа сердцевидная |  |
| 3 | Полынь обыкновенная |  |
| 4 | Злаки |  |
| 5 | Береза повислая |  |
| 6 | Ива белая |  |
| 7 | Лещина обыкновенная |  |
| 8 | Зубровка душистая |  |

Для классификации пыльцевых зерен с целью повышения точности распознавания используется такая парадигма глубокого обучения (*deep learning*), как перенос знаний (*transfer learning*), который зарекомендовал себя в задачах машинного обучения [4, 5] и не был ранее применен другими исследователями для решения этой задачи. Перенос знаний (иначе: *one-shot learning*) дает хорошие результаты в случае, когда в задаче многоклассовой классификации некоторые классы представлены слабо (данных по ним не хватает), либо когда на определенных классах точность классификатора значительно падает. Как раз такими данными и являются изображения пыльцы: их трудоемко собирать, в то же время пыльца отдельных видов аллергенов практически отсутствует в пробах с аэроловушек и в гербарных образцах, хотя ее также необходимо идентифицировать. Суть подхода – в попеременном обучении на небольшой части данных одной из подзадач основной задачи и одновременной оптимизации функции потерь для всех подзадач. При этом для перехода от одной подзадачи к другой используется единое латентное представление данных, полученное в ходе работы глубокой нейросети. Архитектура нейронной сети представлена на рис. 2, где g_θ является функцией внутреннего представления входных образов, или

изображений, а f_{θ} – функцией для опорного образа. Полученные вектора сравниваются с опорным на основе расстояния Отиаи.

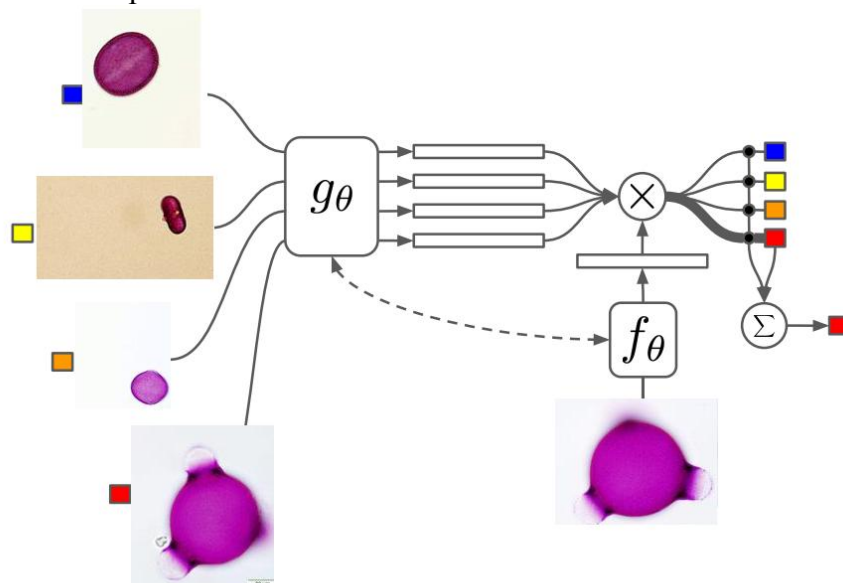


Рис. 2. Архитектура нейронной сети для классификации, основанная на переносе знаний

Ошибка детекции, выявленная с помощью *RetinaNet*, составила 0,0094. Визуализация результата приведена на рис. 3. Набор изображений, полученный после детекции и экстракции найденных объектов, был подан в качестве обучающего для классификации.



Рис. 3. Пример результата детекции, полученный с помощью *RetinaNet*

Matching network была применена к задаче распознавания изображений пыльцевых зерен и показала передовой результат (Табл. 2): свыше 99,9 % точности на 11-классовой задаче классификации, перекрестная энтропия 0,00002. При этом базовым методом, сверточной нейросетью, на этом наборе данных была получена точность 95,9 %, перекрестная энтропия – 0,17. Таким образом, удалось значительно повысить точность распознавания, уменьшить энтропию и достичь результата, ранее не встречавшегося у других исследователей, который демонстрирует возможность применения *one-shot learning* для специфических областей знаний, когда классы очень похожи между собой.

Таблица 2

Сравнение *Matching network* и сверточной нейросети на основе точности распознавания и энтропии

| Мера сравнения | <i>Matching network</i> | Сверточная нейросеть |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| Точность (accuracy) | 99,9 % | 95,9 % |
| Перекрестная энтропия | 0,00002 | 0,17 |

На сегодняшний день почти 30 % людей страдают от аллергии. Это число возросло на 34 % за последние десять лет. Самая главная причина аллергии и астмы, а также ринитов и конъюнктивитов – это пыльца, то есть эти болезни вызываются поллинозом. В связи с высокой распространенностью респираторной аллергии данные о содержании в воздухе пыльцы аллергенных растений имеют важное медицинское и социально-экономическое значение.

Для того чтобы управлять симптомами этих болезней, необходимо знать точное содержание в воздухе пылицы растений-аллергенов. Для этой цели существует более шестисот станций в Европе и более двадцати в России, где палинологи и волонтеры вручную, глядя в микроскопы, занимаются подсчетом пыльцевых зерен, данные о которых получают из специализированных ловушек. Такой ручной подсчет не может обеспечить актуальной информацией больных. Пациентам нужна информация о ежегодном начале и продолжительности сезона выделения пылицы, чтобы определить время начала лечения для контроля симптомов. При путешествии за пределы обычного места проживания пациент хочет иметь информацию о риске потенциальных симптомов пыльцевой аллергии. Так, 24 % взрослых и 40 % детей в Европе не могут свободно путешествовать из-за недостатка информации о концентрации аллергенов в воздухе по регионам. Существенные региональные различия содержания пылицы обосновывают необходимость интеграции локальных данных и глобальной оценки проблемы.

Создание системы предупреждения больных требует автоматизации распознавания и подсчета пылицы, что позволит минимизировать экспертные издержки, ускорить весь процесс мониторинга воздуха и вовремя предупреждать больных о начале периода пыления аллергенов. Общий принцип работы такой системы представлен на рис. 4.

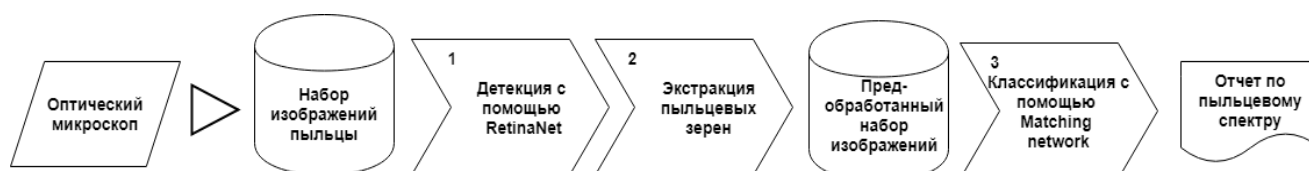


Рис. 4. Алгоритм работы системы определения пылицы аллергенов

При получении на вход данных (изображений с микроскопа) производится детекция пылицы на изображениях (этап 1), экстракция отдельных пыльцевых зерен (этап 2) для последующей их классификации (этап 3). После определения вида растения делается общий вывод о принадлежности их к классу аллергенов (по справочнику) и формируется отчет о пыльцевом спектре, доступный больным онлайн.

Публикации

1. Ханжина Н.Е. Распознавание пыльцевых зерен с помощью GIST-дескрипторов [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб., 2016. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/3728/3728.pdf> (дата обращения: 20.02.18).
2. Khanzhina N.E., Putin E.O. Pollen recognition for allergy and asthma management using GIST features // Communications in Computer and Information Science. 2016. Vol. 674. P. 515–525.
3. Ханжина Н.Е., Замятина Е.Б. Использование технологии CUDA в обучении сверточной нейросети для распознавания пыльцевых зерен // Высокопроизводительные вычисления на графических процессорах: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием с элементами науч. шк. для молодежи (ВВГП-2016). Пермь, 2016. С. 70–81.

Литература

1. Lin T.Y. et al. Focal loss for dense object detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. P. 2980–2988
2. Girshick R. et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. P. 580–587.
3. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016. P. 770–778.
4. Pan S.J., Yang Q. A survey on transfer learning // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2010. Vol. 22. No 10. P. 1345–1359.

5. Vinyals O. et al. Matching networks for one shot learning // Advances in Neural Information Processing Systems. 2016. P. 3630–3638.



Царев Дмитрий Владимирович
Факультет лазерной и световой инженерии
E-mail: dmitriy_93@mail.ru

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОГО УШИРЕНИЯ

Д.В. Царев

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

В работе рассматривается задача сверхизлучательного фазового перехода (СФП) применительно к ансамблю двухуровневых систем, описывающих индивидов в социуме – так называемых s -атомов, взаимодействующих с информационным полем. Предложена модель, представляющая СФП в системе неоднородных s -атомов. Изучено влияние неоднородностей, распределенных по Гауссу и Леви.

Объектом данного исследования являются физические и социальные системы, испытывающие неоднородные уширения, такие как ансамбль частиц в активной среде лазера или ансамбль s -частиц в социальной системе. Целью работы является изучение фазовых переходов в неравновесных физических и социальных системах в условиях неоднородного уширения. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель фазовых переходов в системах, подверженных неоднородным уширениям;
- изучить влияние различных типов уширения на динамику системы, в том числе сравнить эффекты уширений с нормальным распределением и распределением Леви.

Введение

Сегодня одним из основных трендов мировой науки является расширение методов физики за ее пределы. На стыке наук родились такие направления, как эконофизика, социоинженерия, социофизика и другие.

До сих пор для изучения социальных процессов исследователи проводили социальные эксперименты, основанные на различных моделях социальных сетей в рамках теории игр [1]. Результаты таких экспериментов позволяют утверждать, что в условиях неопределенности люди склонны действовать «нерационально», нарушая принципы булевой логики. В [1] показывается, что квантовая теория вероятности и квантовая логика способны гораздо эффективнее описать такие феномены, как нарушение конъюнкции, нарушение дизъюнкции, порядковый эффект при ответе на вопросы и другие. В связи с этим популярность набирают подходы социофизики, заключающиеся в применении математического аппарата статистической и квантовой физики для описания социальных процессов. Много лет назад

было показано, что двухуровневые (спиновые) системы подходят для моделирования явлений социального воздействия, впервые введенных Латаном [2], а затем подтвержденных в социологических исследованиях [3].

Одним из последних достижений социофизики является теория социального лазера А. Хренникова [4], в рамках которой предлагается описывать социум в виде ансамбля так называемых s -атомов. По задумке автора, такой социальный лазер может быть представлен с помощью квантовой и полуклассической теорий лазера, где лазерная генерация описывает возникновение макроскопической поляризации общественного мнения, приводящей к принятию коллективного решения. Примерами таких коллективных решений могут служить результаты выборов, предпочтение потребителями товаров определенных брендов и т. д.

В отличие от физических систем, человеческие индивиды не являются неразличимыми одинаковыми частицами. В этом случае лазерная теория в том виде, в котором она существует сегодня, оказывается неприменимой. Изучение фазовых переходов, одним из которых является лазерная генерация (сверхизлучательный фазовый переход, СФП), в системах неодинаковых частиц под влиянием неоднородного уширения позволит доработать существующую теорию лазера до совместимости с моделью социального лазера А. Хренникова.

Как и в модели социального лазера [4], в нашей модели рассматривается некоторый социальный коллектив в виде ансамбля двухуровневых систем, так называемых s -атомов или социальных атомов. Два возможных состояния данной системы – основное и возбужденное – описывают, соответственно, спокойного и всем довольного индивида и человека, предпринимающего активные социальные действия. S -атомы взаимодействуют друг с другом, обмениваясь квантами социально значимой информации – s -фотонами, представляющими собой высказывания, призывы, лозунги, твиты, посты в социальных сетях и т. д. Кроме того, в модели А. Хренникова s -атомы непрерывно контактируют с внешним информационным полем, например разного рода СМИ. В модели социального лазера такое внешнее поле играет роль накачки, при превышении некоторого порога приводя систему в состояние инверсии населенностей. Когда число социально активных s -атомов превышает число пассивных, в системе возникает генерация когерентного излучения, то есть принимается коллективное решение.

Модель для решения задачи СФП

Система, состоящая из ансамбля s -атомов, взаимодействующих с s -полем, может быть описана при помощи простого гамильтониана, который в форме вторичного квантования имеет вид:

$$H = \hbar\omega_{ph}f^+f + \frac{\hbar}{2} \sum_{j=1}^N \omega_{at_j} (b_j^+ b_j + a_j^+ a_j) + \frac{\hbar g}{\sqrt{N}} \sum_{j=1}^N (f^+ a_j^+ b_j + b_j^+ a_j f), \quad (1)$$

где бозонные операторы f^+ (f), a_j^+ (a_j) и b_j^+ (b_j) описывают рождение (уничтожение) s -фотона, j -го s -атома в основном состоянии $|a\rangle$ и j -го s -атома в возбужденном состоянии $|b\rangle$, соответственно; ω_{ph} и ω_{at_j} – частоты s -поля и перехода j -го s -атома; g – константа связи s -атома с информационным полем. В дальнейшем будем полагать $\hbar = 1$, таким образом, все энергетические величины далее будут иметь размерность частоты.

Гамильтониан (1) коммутирует с оператором полного числа поляритонов N_{pol} , определяемым как сумма общего числа фотонов и возбужденных атомов:

$$N_{pol} = f^+f + \sum_{j=1}^N \omega_{at_j} b_j^+ b_j = N_{ex} + \frac{N}{2}, \quad (2)$$

где

$$N_{ex} = f^+ f + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \omega_{at_j} (b_j^+ b_j - a_j^+ a_j). \quad (3)$$

Величина (3) представляет собой полное число возбуждений, определяемое суммой числа s -фотонов и инверсии s -атомов. Полное число возбуждений (3) в рамках данной задачи является постоянной величиной.

Используя уравнения (2) и (3), можно определить плотность поляритонов ρ_{pol} и плотность возбуждений ρ_{ex} как:

$$\rho_{pol} = \frac{\langle N_{pol} \rangle}{N} = \frac{1}{2} + \rho_{ex};$$

$$\rho_{ex} = \frac{\langle N_{ex} \rangle}{N} = \lambda^2 + \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N z_j,$$

где $\lambda^2 = \langle f^+ f \rangle / N$ – нормированное среднее число фотонов, $z_j = \langle b_j^+ b_j \rangle - \langle a_j^+ a_j \rangle$ – средняя инверсия населенности j -го s -атома. λ представляет собой параметр порядка для задачи сверхизлучательного фазового перехода (СФП). Значение $\lambda = 0$ характеризует так называемое неконденсированное, или нормальное, фазовое состояние. Для современных информационно-ориентированных сообществ этот предел может быть истолкован как полное подавление деятельности отдельных лиц в процессе коммуникации и принятия решений. Напротив, случай $\lambda \neq 0$ характеризует конденсированное, или сверхтекучее, состояние. В этом пределе происходит когерентное высвобождение социальной энергии.

С помощью вариационного подхода с использованием большого канонического ансамбля можно получить уравнение для параметра порядка λ . Опуская детали для краткости, запишем сразу окончательные уравнения в пределе нулевой температуры:

$$\Delta - \mu = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\zeta) d\zeta}{\sqrt{(\sigma\zeta - \mu) + 4\lambda^2}}; \quad (4)$$

$$\rho_{ex} = \lambda^2 - \frac{1}{2N} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\sigma\zeta - \mu) f(\zeta) d\zeta}{\sqrt{(\sigma\zeta - \mu) + 4\lambda^2}}, \quad (5)$$

где $f(\zeta)$ – некоторая функция распределения флуктуирующей части собственной частоты s -атомов в ансамбле; σ – ширина этого распределения; $\zeta \equiv \zeta_j = \omega_{at_j} - \omega_0$ – разница между частотой перехода s -атома и средней частотой перехода по ансамблю, описывающая неоднородность ансамбля; μ – химический потенциал и $\Delta = \omega_{ph} - \omega_0$ – отстройка средней частоты перехода s -атомов от частоты информационного поля. Стоит отметить, что замена суммирования более удобным интегрированием возможна лишь в том случае, если число s -атомов достаточно велико, а различие между ними достаточно мало, чтобы величина ζ_j менялась плавно при переходе от одного s -атома к другому.

В качестве функций распределения $f(\zeta)$ в (4) и (5) были исследованы функция Гаусса:

$$f(\zeta) = C \exp(-\zeta^2) \quad (6)$$

и функция Леви:

$$f(\zeta) = C \operatorname{Re} \left[\int_0^{\infty} \exp(-2i\zeta x - x^\alpha) dx \right], \quad (7)$$

где константы C выбираются с учетом условия нормировки:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\zeta) d\zeta = 1.$$

Распределение Леви (7) широко применяется, например, в экономике, в случаях, когда необходимо описать системы, подверженные сильным флуктуациям. Параметр $\alpha \in (0,2]$ отвечает за величину этих флуктуаций или, как говорят, за тяжелые хвосты распределения Леви. На рис. 1 изображены распределения Леви для различных α , чтобы показать это влияние. Можно видеть, что флуктуации увеличиваются при $\alpha \rightarrow 0$. Также можно заметить, что при $\alpha = 2$ распределение Леви совпадает с распределением Гаусса (6), таким образом, последнее можно считать частным случаем распределения Леви в пределе низких флуктуаций.

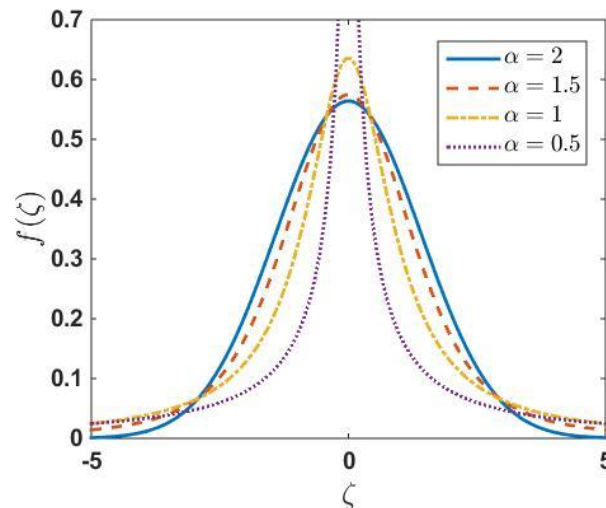


Рис. 1. Сравнение функций распределения Леви с различными значениями параметра α .
Кривая с $\alpha = 2$ совпадает с кривой распределения Гаусса

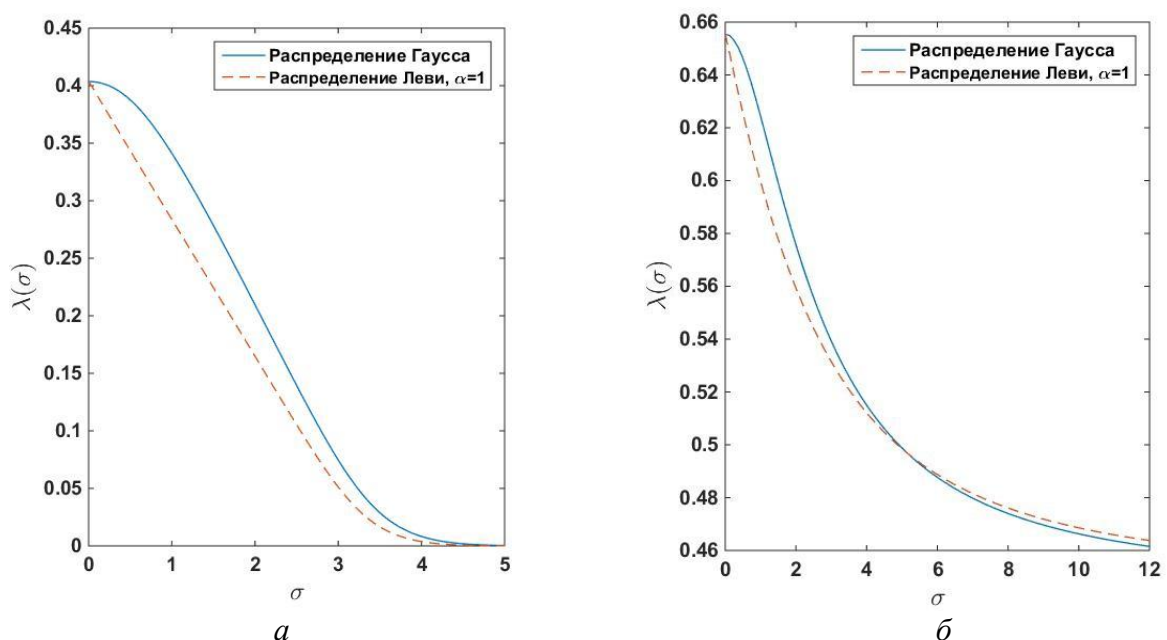


Рис. 2. Зависимости параметра порядка λ от ширины неоднородного уширения σ :
 $a - \rho = -0,2$; $b - \rho = 0,2$

Полученная модель, описываемая уравнениями (4) и (5), была исследована численными методами, некоторые результаты представлены далее. Зависимости $\lambda(\sigma)$, изображенные на рис. 2, демонстрируют влияние тяжелых хвостов распределения Леви на СФП. Из рисунка видно, что при распределении с тяжелыми хвостами параметр порядка λ растет медленнее с ростом σ при $\rho < 0$; таким образом, при больших флуктуациях в системе s -атомов

наступление СФП требует все более узкого распределения неоднородностей, (рис. 2а). С другой стороны, при $\rho > 0$ наблюдается обратная картина: система с неоднородностями, распределенными по Леви, после определенного порога демонстрирует более высокие значения λ , чем система с распределением Гаусса с той же шириной σ , хотя в последнем случае это влияние весьма незначительно.

Заключение

В результате проделанной работы была разработана модель фазовых переходов в системах, подверженных неоднородным уширениям; изучено влияние различных типов уширения на динамику системы. Показано, что при отрицательных значениях плотности возбуждений тяжелые хвосты препятствуют СФП, тогда как при положительных значениях наоборот, способствуют.

Литература

1. *Busemeyer J.R., Bruza P.D.* Quantum models of cognition and decision. Cambridge, 2012. – 424 p.
2. *Latane B.* The psychology of social impact // *American Psychologist*. 1981. Vol. 36. No 4. P. 343–356.
3. *Vallacher R.R., Nowak A.* Dynamical systems in social psychology. San Diego, 1994. – 305 p.
4. *Khrennikov A.* “Social Laser”: action amplification by stimulated emission of social energy // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016. Vol. 374. No 2058. P. 20150094.



Чугина Юлия Владимировна
Факультет систем управления и робототехники
E-mail: chugina.yulya@mail.ru

АВТОМАТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОММУНИКАЦИОННОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ЭНЕРГОСЕТИ

Ю.В. Чугина

Научный руководитель – доцент И.Б. Фуртат

В работе рассматривается задача синхронизации сети синхронных электрических генераторов по параметрам вырабатываемого напряжения в условиях ограниченных возмущающих воздействий и коммуникационных запаздываний. Предлагается использование локальных автоматических регуляторов возбуждения, реализующих робастный алгоритм управления. Эффективность работы регулятора продемонстрирована путем компьютерного моделирования.

Объектом настоящего исследования является модель сети электрических генераторов, отражающая механическую динамику вращения роторов, электрическую динамику статоров и перетекание мощностей по линиям электропередачи, учитывающая влияние возмущающих

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

воздействий и коммуникационного запаздывания. Цель проекта – разработка автоматического регулятора возбуждения (АРВ), обеспечивающего синхронизацию частот вращения роторов генераторов с требуемой точностью за конечное время.

В настоящее время разработано множество типов АРВ, различающихся скоростью реакции, точностью синхронизации и надежностью работы в различных практических ситуациях. Подходы [1, 2], отличающиеся высоким качеством управления при относительно простой структуре регуляторов, имеют ряд недостатков, к которым относятся необходимость измерения множества характеристик для реализации управления, отсутствие робастности к изменению параметров системы и игнорирование наличия коммуникационного запаздывания при синтезе регуляторов. Пренебрежение фактором запаздывания объясняется тем, что обычно в локально устанавливаемых системах управления генераторами задержки не превышают 10 мс, что относительно немного в сравнении с постоянными времени управляемой системы. Тем не менее существуют экспертные мнения, заключающиеся в том, что задержки длительностью более 1 мс могут вызывать выход генераторов из синхронизма.

Предлагаемый в данной работе алгоритм опирается на результаты, полученные ранее [3] и дополненные учетом коммуникационных запаздываний в сети. Основой метода управления является алгоритм компенсации ограниченных возбуждений [4]. Для оценки эффективности полученного алгоритма проводилось компьютерное моделирование системы управления и сравнение полученных результатов с аналогом [2].

Постановка задачи

Рассмотрим математическую модель сети синхронных генераторов, приближенно отражающих динамику их работы. Механическая динамика описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i(t) &= \omega_i(t), \\ \dot{\omega}_i(t) &= -\frac{D_i}{2H_i}\omega_i(t) - \frac{\omega_0}{2H_i}\Delta P_{ei}(t), \quad i = \overline{1, k}; \end{aligned} \quad (1)$$

электрическая динамика статора – уравнениями:

$$\dot{E}'_{qi}(t) = \frac{1}{T'_{d0i}}(E_{fi}(t) - E_{qi}(t)), \quad i = \overline{1, k}; \quad (2)$$

электрические уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} E_{qi}(t) &= x_{adi}I_{fi}(t) = E'_{qi}(t) - (x_{di} - x'_{di})I_{di}(t), \\ E_{fi}(t) &= k_{ci}u_{fi}(t), \\ P_{ei}(t) &= \sum_{j \in N_i} E'_{qi}(t)E'_{qj}(t)M_{ij} \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)), \\ Q_{ei}(t) &= -\sum_{j \in N_i} E'_{qi}(t)E'_{qj}(t)M_{ij} \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t)), \\ I_{di}(t) &= -\sum_{j \in N_i} E'_{qj}(t)M_{ij} \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t)), \\ I_{qi}(t) &= \sum_{j \in N_i} E'_{qj}(t)M_{ij} \sin(\delta_i(t) - \delta_j(t)), \\ V_{ii}(t) &= \frac{1}{x_{dsi}} \sqrt{(E'_{qi}(t) - x'_{di}I_{di}(t))^2 + (x'_{di}I_{qi}(t))^2}, \quad i = \overline{1, k}, \end{aligned} \quad (3)$$

где k – количество генераторов; N_i – множество генераторов, смежных с i -м генератором; $\delta_i(t)$ – угол поворота ротора относительно его синхронной оси вращения; $\omega_i(t)$ – относительная скорость ротора; ω_0 – скорость ротора в синхронном режиме; $\Delta P_{ei}(t) = P_{ei}(t) - P_{mi}(t)$, $P_{ei}(t)$ – активная электрическая мощность; $P_{mi}(t) = P_{mi0} + \Delta P_{mi}(t)$, $P_{mi}(t)$ – механическая мощность, $\Delta P_{mi}(t)$ – возмущение механической мощности; D_i – коэффициент демпфирования;

H_i – коэффициент инерции; T'_{d0i} – переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутом статоре; x'_{di} – переходное реактивное сопротивление по продольной оси; x_{di} – реактивное сопротивление вдоль продольной оси; x_{adi} – взаимное сопротивление между обмотками возбуждения и статора; k_{ci} – инерционная постоянная; $u_{fi}(t)$ – напряжение на обмотке возбуждения ротора; $E_{qi}(t)$ – электродвижущая сила (ЭДС) по поперечной оси; $E_{fi}(t)$ – эквивалентная ЭДС возбуждения; $E'_{qi}(t)$ – переходная ЭДС по поперечной оси; $I_{qi}(t)$ – ток по поперечной оси; $I_{fi}(t)$ – ток возбуждения; $I_{di}(t)$ – ток по продольной оси; $Q_{ei}(t)$ – реактивная мощность; $V_{ii}(t)$ – напряжение на зажимах статора; M_{ij} – взаимная проводимость между i -м и j -м генераторами.

Предполагается, что значения параметров: D_i , H_i , T'_{d0i} , x'_{di} , x_{di} , x_{adi} , x_{dsi} , k_{ci} , M_{ij} и возмущающих воздействий $\Delta P_{mi}(t)$ неизвестны. При этом для каждой подсистемы выполняются условия предположений алгоритма [4]. Для прямого измерения доступны только сигналы: $\omega_i(t)$, $i = \overline{1, k}$. Кроме того, для определенности знака обратной связи полагается, что известны значения токов: $I_{qi}(t)$, $i = \overline{1, k}$.

Задача состоит в формировании закона управления сигналом $u_{fi}(t)$, обеспечивающего соблюдение условия:

$$|\omega_i(t) - \omega_j(t - \tau_{ji}(t))| < \delta, \text{ при } t > T, i = \overline{1, k}, j \in N_i, \quad (4)$$

где $T > 0$ – время, по истечении которого выполняется (4); $\delta > 0$ – требуемая точность; $\tau_{ji}(t)$ – неизвестное время запаздывания.

Синтез системы управления

Рассмотрим решение задачи на численном примере сети, состоящей из трех генераторов G_i , $i = 1, 2, 3$ (рис. 1), где генератор G_3 вырабатывает эталонное значение частоты.

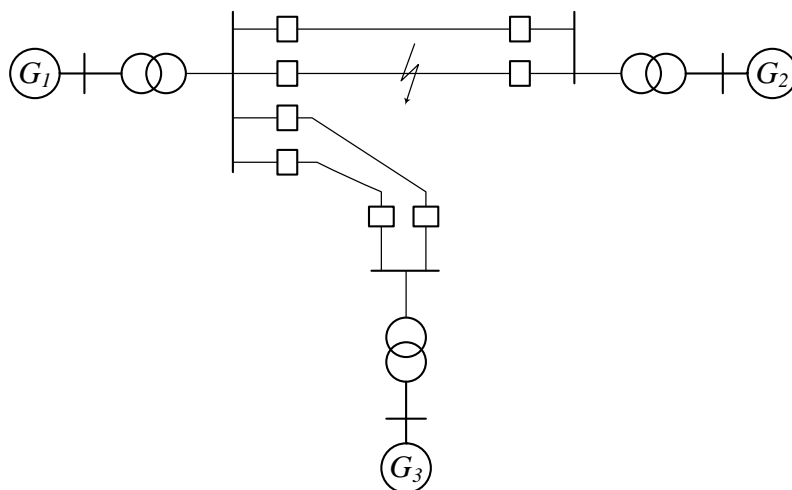


Рис. 1. Схема сети генераторов

Модель сети описывается уравнениями (1–3). Множество возможных значений неопределенных параметров задается неравенствами: $6 \leq T'_{d0i} \leq 8$; $3 \leq D_i \leq 5$; $4 \leq H_i \leq 5,5$; $1 \leq k_{ci} \leq 3$; $1,8 \leq x_{di} \leq 2,4$; $0,2 \leq x'_{di} \leq 0,4$; $0,3 \leq M_{ij} \leq 3$; $i, j = 1, 2, 3$.

Если привести модель (1–3) к форме Коши, получим систему третьего порядка:

$$\dot{z}_i(t) = A_i z_i(t) + B_i(t) (u_{fi}(t) + f_i(t)), \quad \omega_i(t) = C z_i(t), \quad (5)$$

где

$$z_i(t) = [\delta_i(t), \omega_i(t), \Delta P_{ei}(t)]^T, A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0,5D_i H_i^{-1} & -0,5\omega_0 H_i^{-1} \\ 0 & 0 & -(T'_{d0i})^{-1} \end{bmatrix}, B_i(t) = [0, 0, k_{ci} I_{qi}(t) / T'_{d0i}]^T,$$

$$C = [0, 1, 0], f_i(t) = \frac{1}{k_{ci} I_{qi}(t)} [(x_{di} - x'_{di}) I_{qi}(t) I_{di}(t) + P_{mi}(t) + T'_{d0i} E'_{qi}(t) \dot{I}_{qi}(t) - T'_{d0i} \Delta \dot{P}_{mi}(t)], i = \overline{1, 3}.$$

В полученной системе все возмущения выделены в отдельные сигналы $f_i(t)$.

В соответствии с подходом [4] в систему вводятся вспомогательные контура, представляющие собой системы с желаемой динамикой, порядка, равного относительной степени системы (5):

$$(p^2 + 4p + 4) \bar{e}_i(t) = -u_{fi}(t), i = \overline{1, 3},$$

где $p = d/dt$. Рассмотрение рассогласования динамик выходов вспомогательных контуров $\bar{e}_i(t)$ и ошибок слежения $e_i(t) = \sum_{j \in N_i} (\omega_i(t) - \omega_j(t - \tau_{ji}(t)))$, $\zeta_i(t) = e_i(t) - \bar{e}_i(t)$ позволяет

вычленив влияние возмущающих воздействий на динамику системы (5). Закон управления формирует сигнал, оказывающий обратное воздействие, тем самым компенсируя возмущение:

$$u_{fi}(t) = \dot{\xi}_{i2}(t) + 4\xi_{i2}(t) + 4\xi_{i1}(t), i = \overline{1, 3}, \quad (6)$$

где $\xi_i(t) \in R^2$ – оценка вектора $[\zeta_i(t), \dot{\zeta}_i(t)]^T$, получаемая посредством наблюдателя Халила:

$$\dot{\xi}_{i1}(t) = \xi_{i2}(t) - 4 \cdot 100 (\xi_{i1}(t) - \zeta_i(t)), \quad \dot{\xi}_{i2}(t) = -4 \cdot 100^2 (\xi_{i1}(t) - \zeta_i(t)), \quad \xi_{i1}(0) = \xi_{i2}(0) = 0, \quad i = \overline{1, 3}.$$

При моделировании рассмотрим стабилизацию системы после аварийных ситуаций двух типов. Под авариями понимается резкое изменение проводимости линий передачи, вызванное, например, трехфазным коротким замыканием.

Авария 1 [2]. $M_{12} = M_{21} = 0,4853$ о. е. до момента времени $t = 1$ с; $M_{12} = M_{21} = 2,9$ о. е. в момент времени $t = 1$ с; авария устраняется ($M_{12} = M_{21} = 0,4853$ о. е.) переключением с поврежденной линии на запасную в момент времени $t = 1,6$ с.

Авария 2. $M_{12} = M_{21} = 0,4853$ о. е. до момента времени $t = 25$ с; $M_{12} = M_{21} = 2,9$ о. е. в момент времени $t = 25$ с; авария устраняется переключением с поврежденной линии на запасную $M_{12} = M_{21} = 0,7$ о. е. в момент времени $t = 25,6$ с.

Разница между сценариями Аварии 2 и Аварии 1, как можно видеть, заключается в том, что проводимость запасной линии отличается от проводимости исходной линии передачи.

Выберем конкретные численные значения параметров генераторов G_i , $i = \overline{1, 3}$:

$$G_1: D_1 = 4,5 \text{ о. е.}, H_1 = 5,5 \text{ с}, T'_{d01} = 1,5 \text{ с}, x_{d1} = 1,863 \text{ о. е.}, x'_{d1} = 0,257 \text{ о. е.}, P_{m1}(t) = 0,89 + 0,02 \sin t \text{ о. е.}, V_{t01} = 1 \text{ о. е.}, k_{c1} = 1 \text{ о. е.}, \delta_1(0) = \pi / 3 \text{ рад};$$

$$G_2: D_2 = 4,7 \text{ о. е.}, H_2 = 4,8 \text{ с}, T'_{d02} = 2,1 \text{ с}, x_{d2} = 2,1 \text{ о. е.}, x'_{d2} = 0,32 \text{ о. е.}, P_{m2}(t) = 0,83 + 0,03 \sin 0,9t \text{ о. е.}, V_{t02} = 0,9 \text{ о. е.}, k_{c2} = 1 \text{ о. е.}, \delta_2(0) = 11\pi / 36 \text{ рад};$$

$$G_3: D_3 = 5 \text{ о. е.}, H_3 = 5,2 \text{ с}, T'_{d03} = 2 \text{ с}, x_{d3} = 1,9 \text{ о. е.}, x'_{d3} = 0,28 \text{ о. е.}, P_{m3}(t) = 0,85 \text{ о. е.}, V_{t03} = 1,1 \text{ о. е.}, k_{c3} = 1 \text{ о. е.}, \delta_3(0) = 13\pi / 36 \text{ рад};$$

$$\omega_0 = 314,159 \text{ рад/с}, \alpha(0) = 0 \text{ рад/с и } \Delta P_{ei}(0) = 0 \text{ о. е.}$$

Коммуникационные запаздывания зададим в виде следующих функций:

$$\tau_{31}(t) = 0,01 + 0,01 \sin t \text{ с}, \quad \tau_{12}(t) = \tau_{21}(t) = 0,02 + 0,02 \cos 0,3 t \text{ с}.$$

Ограничение на амплитуду управляющих сигналов (6) определим интервалом:

$$u_{fi}(t) \in [-3, 6] \text{ о. е.}, \quad i = \overline{1, 3}.$$

Результаты моделирования

Моделирование системы управления проводилось при помощи среды *MATLAB/Simulink*. Результаты представлены графиками переходных процессов относительных угловых скоростей вращения роторов $\omega_i(t)$, $i = \overline{1, 3}$ (рис. 2, 3). Индекс «3» соответствует значению эталонной частоты, вырабатываемой генератором G_3 . Индекс « i -AL» определяет угловые скорости вращения роторов генераторов в системе управления, использующей представленный в настоящей работе метод вспомогательного контура. Индексы « i -Hill» и « i -Hillp» применяются для обозначения результатов моделирования регулятора, представленного в работе [2], без возмущения механической мощности $\Delta P_{mi}(t)$ и при наличии возмущения соответственно.

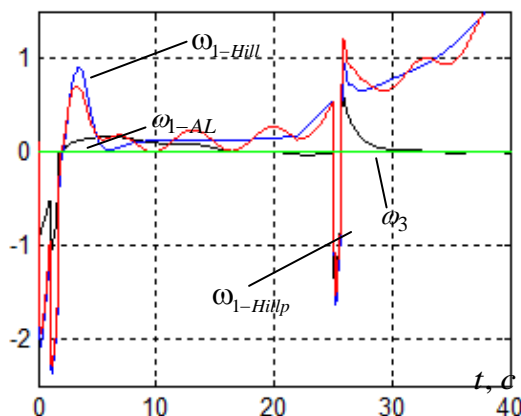


Рис. 2. Переходные процессы по $\omega_3(t)$, $\omega_{1-AL}(t)$, $\omega_{1-Hill}(t)$, $\omega_{1-Hillp}(t)$, рад/с

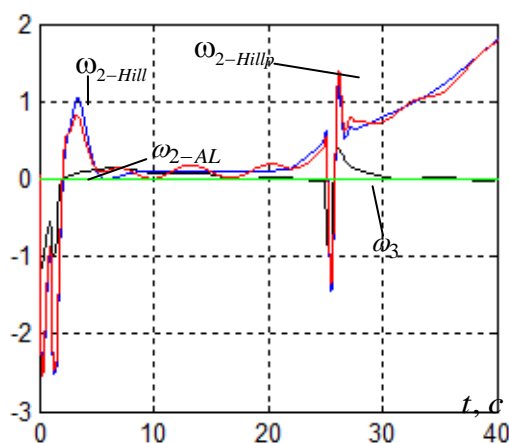


Рис. 3. Переходные процессы по $\omega_3(t)$, $\omega_{2-AL}(t)$, $\omega_{2-Hill}(t)$, $\omega_{2-Hillp}(t)$, рад/с

Таким образом, система управления обеспечивает цель управления (4) с точностью 0,1 рад/с спустя $T = 5$ с после ликвидации аварий. Кроме того, по сравнению с аналогичным алгоритмом [2], полученный результат робастен по отношению к изменению параметров сети.

Заключение

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

Получен робастный алгоритм управления для сетей электрических генераторов, подверженных влиянию возмущающих воздействий и коммуникационных запаздываний. Проведена апробация алгоритма посредством компьютерного моделирования. Ее результаты показали, что предлагаемый регулятор обеспечивает устойчивость системы и поддерживает отклонение частоты вырабатываемого напряжения от требуемых значений в пределах, установленных стандартом ГОСТ 13109-97, согласно которому допускается относительная частота в пределах 1,256 рад/с при нормальных режимах и 2,512 рад/с в случае кратковременных аварийных воздействий до срабатывания автоматических систем защиты. Сравнение с аналогичной работой [2] показало более высокую надежность и точность синхронизации вращения роторов.

Публикации

1. *Chugina J.V. et al.* Robust control of multi-machine power systems caused by perturbation of mechanical input power and variable unknown communication time-delay [Electronic resource] // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. No 14. P. 24–29. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316312575?via%3Dihub> (accessed: 06.02.2019).
2. *Chugina J.V. et al.* Compensation of disturbances in multi-machine power systems caused by perturbation of mechanical input power // European Control Conference (ECC). 2015. P. 794–799.

Литература

1. *Barabanov A.E. et al.* On transient stabilization of multi-machine power systems: a «globally» convergent controller for structure-preserving models // Proceedings of the 17th IFAC World Congress. Seoul, 2008. P. 5273–5279.
2. *Guo G. et al.* Nonlinear output stabilization control for multimachine power systems // IEEE Transactions on Circuits Systems. 2000. Vol. 47. No 1. P. 46–53.
3. *Chugina J.V. et al.* Compensation of disturbances in multi-machine power systems caused by perturbation of mechanical input power // European Control Conference (ECC). 2015. P. 794–799.
4. *Цыкунов А.М.* Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 103–115.



Шаталова Александрина Сергеевна
Факультет пищевой биотехнологии и инженерии
E-mail: shatalovaaleks@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ РЕЦЕПТУР ПРОДУКТОВ НА ЗЕРНОВОЙ ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.С. Шаталова

Научный руководитель – доцент Д.А. Бараненко

Работа посвящена исследованию и созданию рецептур паштетов на зерновой основе, обладающих функциональными свойствами. В качестве функциональных ингредиентов использованы коммерческие препараты экзополисахаридов – это природные бета-глюканы, с разветвленным строением. Доказано, что полученные паштеты обладают сахарорегулирующими и противодиабетическими свойствами, улучшают пищеварительные процессы.

Большая часть населения Российской Федерации в результате технологической обработки и использования неполноценного по химическому составу пищевого сырья не получает необходимого количества незаменимых компонентов пищи, что приводит к болезням, преждевременной старости и сокращению продолжительности жизни. Ранее считалось, что пищевые продукты служат в основном для восполнения затраченной энергии. Однако в течение последних двух десятилетий в связи с ускоренными темпами развития жизни и технологий в науке о питании произошел значительный сдвиг тренда от удовлетворения голода в сторону рационального питания [1].

Следуя тенденциям и для удовлетворения потребительского спроса, пищевая промышленность представила новую категорию продуктов, названных функциональными. Они обладают антиканцерогенными, антиоксидантными, противовоспалительными, холестеринорегулирующими и многими другими полезными свойствами [1, 2].

Поскольку проблема микроэкологии кишечника в последние годы привлекает большое внимание врачей, необходимо найти способ, позволяющий регулировать состав кишечной микробиоты. Одно из перспективных решений этой проблемы – применение пребиотиков, которое способствует увеличению числа молочнокислых бактерий – естественных обитателей кишечника. Исследователей привлекает разработка продуктов питания с использованием в качестве биодобавки живых культур микроорганизмов – пробиотических продуктов. Прежде всего, создание подобных продуктов направлено на удовлетворение физиологической потребности организма человека в отдельных биологически активных веществах, важнейшими среди которых являются экзополисахариды (ЭПС). ЭПС – высокомолекулярные полимеры, состоящие из остатков сахара, которые секретируются микроорганизмами в окружающую их среду и не усваиваются в ЖКТ человека. Такие полимеры относят к пребиотикам, например, декстраны, экзогликаны (гетеро- и гомогликаны). Они также являются стимуляторами защитных функций организма [3].

Цель научно-исследовательской работы – анализ, а также обоснование рецептур и технологических параметров производства продуктов функционального назначения на зерновой основе.

Согласно ГОСТ Р 52349-2005, все функциональные продукты должны проходить доклинические испытания, если функциональный ингредиент не был включен в реестр разрешенных. В настоящей работе в качестве лабораторных животных для проведения доклинических испытаний использовались мыши инбредной линии *Balb/c*.

Материалы и методы исследования

Для разработки рецептур паштетов на зерновой основе, обладающих функциональными свойствами, использовались следующие ингредиенты: декстран (*Leuconostoc mesenteroides*) (*Sigma Aldrich*), инулин (ООО «В-МИН»), кровяная мука (ООО «УНИК “Литораль”»), рыбная мука (ООО «УНИК “Литораль”»), рыбий жир (ООО «Тульская фармацевтическая фабрика»), люцерна (ООО «Старослав»), овсяная мука (ПАО «Петербургский мельничный комбинат»), кукурузная мука (ООО «Агро-Альянс»), рапсовое масло (*Vita D'or*), фасоль (ООО «Агро-Альянс»), шампиньоны (ООО «Бонше»), вешенки (Санкт-Петербург), витамин D3 (вигантол) («Никомед Австрия ГмбХ»).

Полученные паштеты проходили апробацию на мышах инбредной линии. Для оценки их влияния на организм лабораторных животных был проведен ряд анализов.

1. Уровень глюкозы в крови измерялся с помощью глюкометра *OneTouch Select Simple* и тест-полосок этой же фирмы трижды, поскольку каждый прибор имеет свою погрешность;

2. Данные для построения глюкозной кривой получены также в результате трех измерений через каждые 15 минут в течение 1 часа 15 минут. Далее с использованием полученных значений были построены графики изменения глюкозы [3] во времени.

3. Вес животных контролировался на весах фирмы «Невские весы», предел измерения которых – 0,6 кг, минимальное значение – 2 г, погрешность измерения – 0,1 г.

4. Наблюдение за животными проводилось ежедневно, анализировались продукты их жизнедеятельности.

5. Органолептическую оценку паштетов осуществляли согласно методике, описанной в ГОСТ 31986-2012 [4].

Результаты исследований

Таблица

Рецептуры растительных паштетов

| Компоненты паштета | К* | 1* | 2* | 3* | 4* | 5* | 6* | 7* |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Изолят соевый, г | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| Рапсовое масло, г | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 |
| ЭПС, г | - | 8 | 8 | - | - | - | - | - |
| Инулин, г | - | - | - | 8 | - | - | - | 8 |
| Фасоль, г | 10,71 | 10,71 | 10,71 | 10,71 | 10,71 | 10,71 | 10,71 | 10,71 |
| Шампиньоны, г | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 | 15,1 |
| Вешенки, г | 9,35 | 9,35 | 9,35 | 9,35 | 9,35 | 9,35 | 9,35 | 9,35 |
| Морковь, г | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 |
| Лук, г | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 |
| Чеснок, г | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Витамин D3, г | - | | 0,15 | - | 0,05 | 0,15 | 0,5 | 0,05 |
| Соевый соус, г | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Лавровый лист, г | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Соль, г | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Перец, г | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Вода, г | 190 | 212 | 212 | 212 | 190 | 190 | 190 | 212 |

К* – контрольный образец, образцы с 1* по 7* содержат соответственно: декстран, декстран и витамин D3 с дозировкой 100 МЕ, витамин D3 с дозировкой 100 МЕ, инулин, витамин D3 с дозировкой 300 МЕ, витамин D3 с дозировкой 1000 МЕ, инулин и витамин D3 с дозировкой 100 МЕ.

Для выявления наилучшего сочетания компонентов и функциональных ингредиентов было разработано несколько рецептур паштетов, которые соответствовали органолептическим и структурно-механическим характеристикам мясных паштетов, прописанных в [5] и отличались между собой только функциональным ингредиентом (Таблица).

Доинформационные испытания проводились на группах мышей по пять в каждой, которые употребляли в пищу только одну из вышеописанных рецептур. Изменения значений глюкозы за время поддержания диеты у лабораторных животных были построены с учетом полученных данных согласно методике, предложенной в [3] (рис. 1).

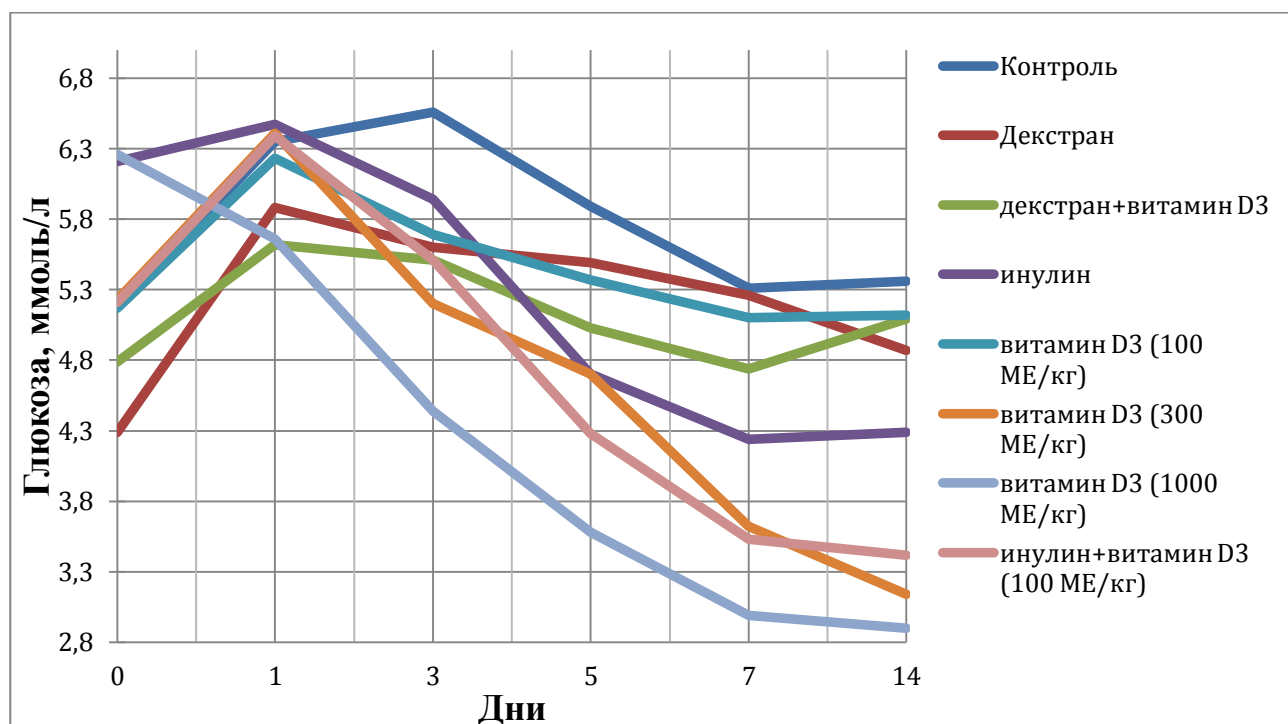


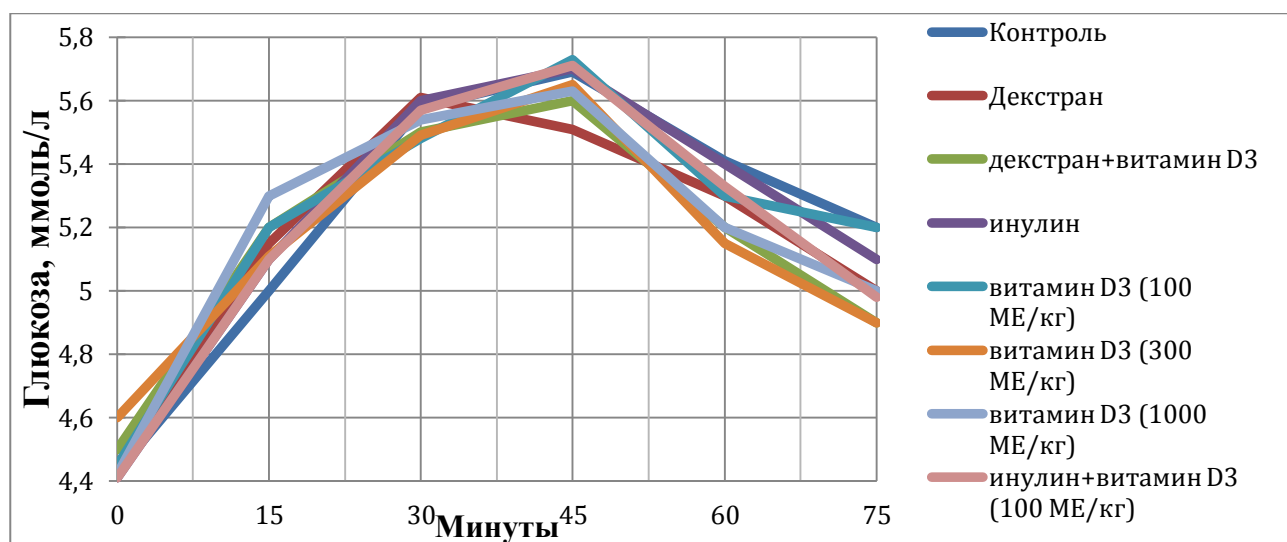
Рис. 1. Изменение уровня глюкозы в крови мышей за время проведения эксперимента

Глюкозные кривые с нагрузкой в начале поддержания диеты лабораторных животных и спустя две недели, построенные по полученным в ходе эксперимента данным согласно методике, предложенной в [3], представлены на рис. 2.

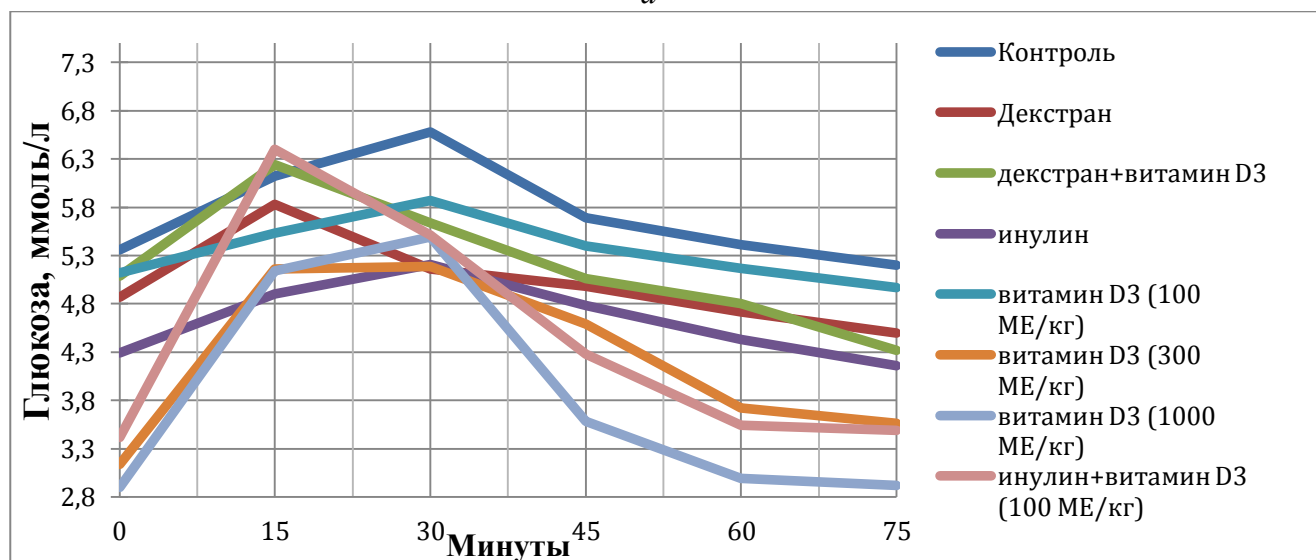
Тест на толерантность к глюкозе (ГТТ) используется для диагностирования преддиабетического и диабетического состояний. Для этого у лабораторных животных до начала эксперимента измеряется уровень глюкозы, затем им перорально вводится углеводсодержащее вещество (в данном исследовании – паштет), после чего каждые пятнадцать минут измеряется уровень глюкозы. При нормальном функционировании поджелудочной железы сначала ожидается резкое увеличение количества глюкозы в крови, а затем плавное ее понижение в течение семидесяти пяти минут (для мышей и крыс) до нормального значения глюкозы с нагрузкой (около 4,3 ммоль/л для лабораторных животных).

Анализ гликемического профиля и глюкозных кривых привел к следующим заключениям:

- инулин в сочетании с витамином D3 при дозировках D3 300 и 1000 МЕ приводит у мышей к гипогликемии, следовательно, данные рецептуры рекомендованы для дальнейшего изучения и использования их компонентов в диабетических продуктах;
- уровень глюкозы у групп мышей, питающихся дополнительно декстраном, а также декстраном с витамином D3 (дозировка 100 МЕ), находится в пределах нормы;
- у группы животных, дополнительно принимающей инулин, уровень глюкозы нормальный, но приближается к нижней отметке, что при дальнейшем поддержании диеты предположительно может привести к гипогликемии. Уровень глюкозы у контрольной группы нормальный, но приближается к верхней отметке, что при повышении дозировки может привести к гипергликемии.



а



б

Рис. 2. Глюкозные кривые мышей: а – в начале поддержания диеты; б – спустя две недели

Изменения значений веса мышей за весь период поддержания диеты представлены на рис. 3 и свидетельствуют об улучшении метаболических процессов (наблюдается увеличение фекальных масс и снижение веса от 20 до 40 % от начального).

Была проведена оценка органолептических показателей образца паштета. Для этого был выбран паштет с декстраном и витамином D3 (дозировка 100 МЕ), который показал наилучшие результаты в доклинических испытаниях.

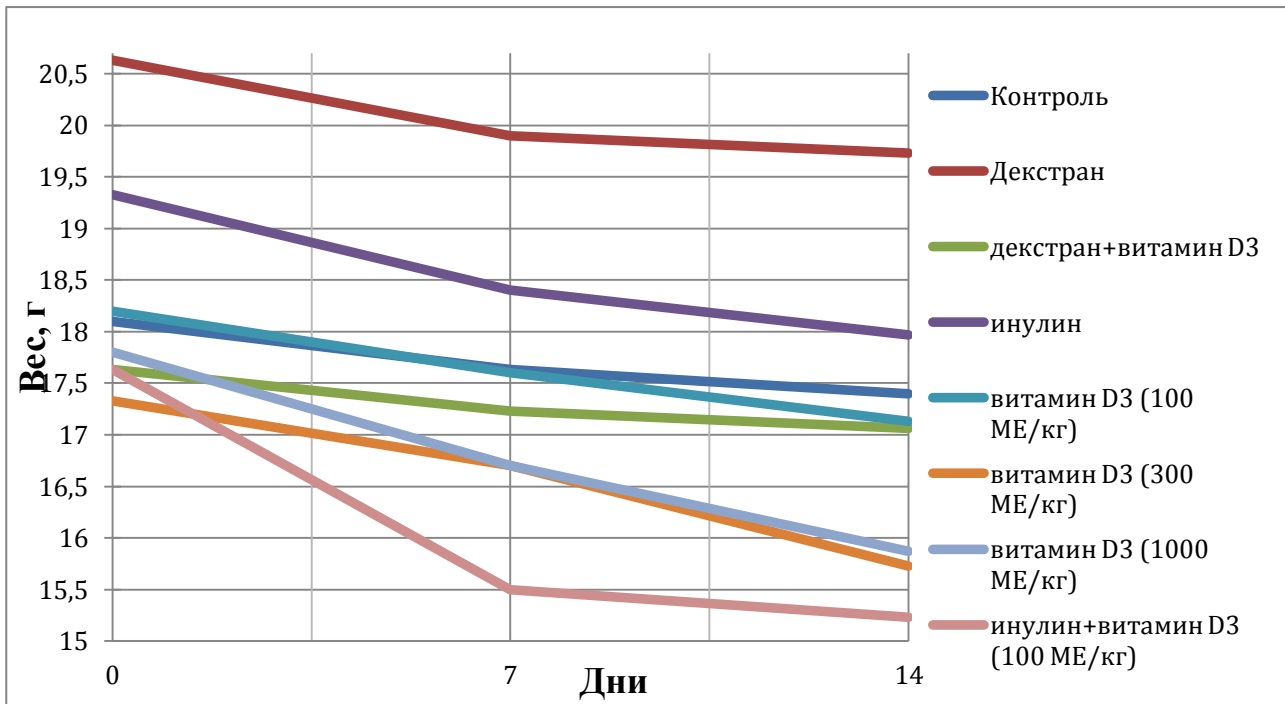


Рис. 3. Изменение веса мышей в течение всего эксперимента

Органолептические показатели контрольного образца паштетов проводились согласно [4] и представлены на рис. 4.

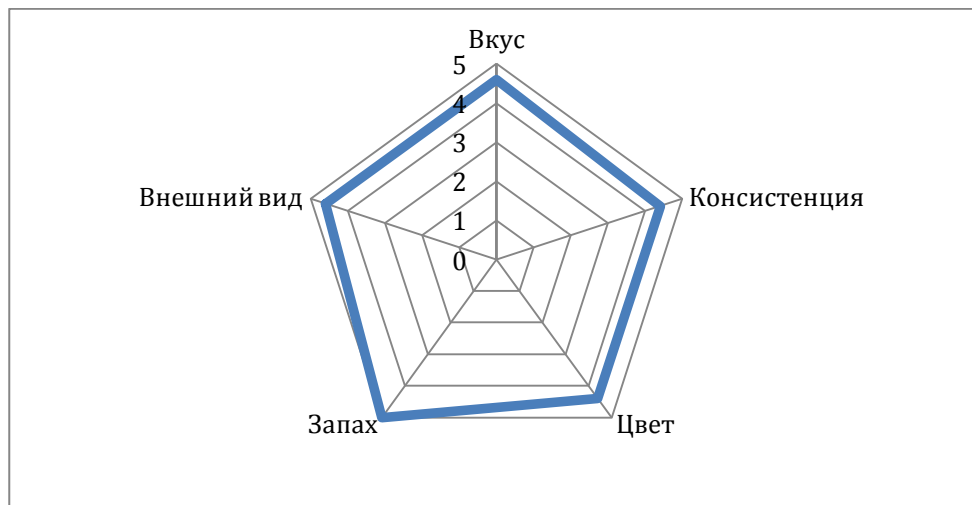


Рис. 4. Органолептический профиль паштетов

Анализ показал, что продукт обладает хорошим качеством и вкусовыми показателями, которые можно улучшить, добавив пищевые красители или такие компоненты, как смородина, свекла, а также уменьшив количество воды для опытных образцов.

Выводы

В данном проекте были разработаны и исследованы паштеты на основе соевого изолята с экзополисахаридами, обладающие способностью снижать уровень сахара в крови и улучшать пищеварение.

Установлено, что декстран обладает функциональными свойствами, которые проявляются в стабилизации уровня глюкозы в крови при регулярном употреблении его в составе пищевых продуктов (4,5–5,0 ммоль/л в течение четырнадцати суток доклинических

испытаний); в регуляции работы поджелудочной железы при проведении ГГТ (уровень глюкозы понижается до нормального значения 4,3 ммоль/л (для лабораторных животных) в течение семидесяти пяти минут после глюкозной нагрузки); в улучшении пищеварения (увеличение фекальных масс, снижение веса от 20 до 40 % от начального).

Для паштетов рекомендована минимальная дозировка декстрана – 43 % от суточной нормы (30 г пищевых волокон), так как его функциональные свойства проявляются более эффективно именно в этом соотношении (согласно рекомендациям по суточному употреблению волокон).

Литература

1. *Alam U. et al.* Vitamin D and diabetic complications: true or false prophet // *Diabetes Therapy*. 2016. Vol. 7. No 1. P. 11–26.
2. *Haussler M.R. et al.* Molecular mechanisms of vitamin D action // *Calcified Tissue International*. 2013. Vol. 92. No 2. P. 77–98.
3. *Атаманова С.А. и др.* Предварительная оценка гипогликемического действия сапонинов столовой свеклы [Электронный ресурс] // *Электронный научно-образовательный вестник «Здоровье и образование в XXI веке»*. 2006. Т. 8. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/predvaritelnaya-otsenka-gipoglikemicheskogo-deystviya-saponinov-stolovoy-svekly> (дата обращения: 02.06.16).
4. ГОСТ 31986-2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания. М., 2013. – 16 с.
5. ГОСТ Р 55334-2012. Паштеты мясные и мясосодержащие. Технические условия. М., 2012. – 29 с.



Шилин Александр Сергеевич
Факультет низкотемпературной энергетики
E-mail: 0346440@mail.ru

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

А.С. Шилин

Научный руководитель – профессор А.В. Цыганков

Актуальность настоящей работы определяется необходимостью повышения энергетической эффективности зданий и сооружений при выполнении санитарно-гигиенических требований к качеству воздуха в помещениях. Рассматриваемая проблема является многофакторной и включает несколько направлений уменьшения затрат энергетических и материальных ресурсов в системах отопления, вентиляции и кондиционирования: архитектурно-строительные решения, использование низкопотенциальной тепловой энергии, оптимизация систем управления микроклиматом.

Целью научного проекта является разработка алгоритмов и методов оптимизации технических решений систем обеспечения микроклимата (отопления, вентиляции

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

и кондиционирования воздуха) общественных зданий для достижения повышенной энергетической эффективности и уменьшения затрат ресурсов, используемых в этих системах.

Алгоритм оптимизации технических решений для систем обеспечения микроклимата общественных зданий

1. Определение исходных параметров наружного воздуха.
2. Определение категорий помещений (выбор оптимальных значений температуры, относительной влажности, подвижности и расхода внутреннего воздуха согласно нормативным документам [1, 2]).
3. Расчет теплозащитных свойств ограждающих конструкций.
4. Расчет потерь и поступлений теплоты в помещениях.
5. Выбор оптимальной технологической схемы обработки наружного воздуха для подачи в помещения.
6. Выбор оптимального технического решения для систем обеспечения микроклимата помещений из обширного списка оборудования.
7. Определение экономических показателей.
8. Утверждение выбранного технического решения.
9. Определение энергетической эффективности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Математическая модель процессов тепломассопереноса в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха

С целью оптимизации технических решений систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха общественных зданий была разработана математическая модель, которая позволяет определять величины температур внутреннего воздуха помещений, а также наружных и внутренних поверхностей ограждений. Определение этих параметров позволяет рассчитать величину теплового потока, проходящего через наружные ограждения и выбрать оптимальную технологическую схему обработки воздуха, а также подобрать соответствующий вариант оборудования систем обеспечения микроклимата.

Помещение или здание обладает следующими характеристиками:

$H = \text{const}$ – высота помещения, м;

$h = \text{const}$ – толщина наружных ограждений, м;

$P_{in}, P_{out} = \text{const}$ – периметр внешней и внутренней поверхностей ограждения, м;

$F_{in}, F_{out} = \text{const}$ – площадь внешней и внутренней поверхностей ограждения, м²;

$\alpha_{in}, \alpha_{out} = \text{const}$ – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей ограждения соответственно, Вт/(м²·°C);

$\lambda_w = \text{const}$ – коэффициент теплопроводности ограждения, Вт/(м·°C);

$c_{pa}, c_{pw} = \text{const}$ – удельные теплоемкости воздуха и наружных ограждений соответственно, Дж/(кг·°C);

$\rho_a, \rho_w = \text{const}$ – плотности воздуха и наружных ограждений соответственно, кг/м³;

q_{in} – величина теплоступлений, Вт;

$t_{out} = \text{var}$ – температура наружного воздуха, °C;

$t_{in} = \text{var}$ – температура внутреннего воздуха, °C;

$t_1 = \text{var}$ – температура внутренней поверхности ограждения, °C;

$t_2 = \text{var}$ – температура наружной поверхности ограждения, °C;

$\tau = \text{var}$ – время, ч.

Величина теплоступлений и температура наружного воздуха есть функция от времени:

$$q_{in} = f(\tau) = q_0, q_1, q_2 \dots q_n, t_{out} = f(\tau) = t_0, t_1, t_2 \dots t_n.$$

Для рассматриваемого периода $n = 24$ ч. соблюдается условие цикличности:

$$q_0 = q_n, t_0 = t_n.$$

Математическая модель оптимизации систем обеспечения микроклимата имеет вид:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0, \\ Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 = 0, \\ \frac{t_{2,i} - t_{1,i}}{2} \cdot \lambda_w = \pm \alpha_{out} \cdot (t_{out,i} - t_{2,i}), \end{cases} \quad (1)$$

где Q_1 – количество теплоты в помещении, Вт:

$$Q_1 = t_{in,i} \cdot c_{pa} \cdot \rho_a \cdot S_{in} \cdot H; \quad (2)$$

Q_2 – количество теплоты в помещении через момент времени $\Delta\tau$, Вт:

$$Q_2 = t_{in,i+1} \cdot c_{pa} \cdot \rho_a \cdot S_{in} \cdot H; \quad (3)$$

Q_3 – количество теплоты, вошедшей (вышедшей) с тепловым потоком q_{in} , Вт:

$$Q_3 = \frac{1}{2} \cdot (q_{in,i} + q_{in,i+1}) \cdot \Delta\tau; \quad (4)$$

Q_4 – количество теплоты, вошедшей (вышедшей) в ограждение, Вт:

$$Q_4 = \pm \left[\frac{t_{in,i} + t_{in,i+1}}{2} - \frac{t_{1,i} + t_{1,i+1}}{2} \right] \cdot \alpha_{in} \cdot \Delta\tau \cdot P_{in} \cdot H; \quad (5)$$

Q_5 – количество теплоты в ограждении, Вт:

$$Q_5 = \frac{t_{1,i} + t_{2,i}}{2} \cdot c_{pw} \cdot \rho_w \cdot V_w; \quad (6)$$

Q_6 – количество теплоты в ограждении через момент времени $\Delta\tau$, Вт:

$$Q_6 = \frac{t_{1,i+1} + t_{2,i+1}}{2} \cdot c_{pw} \cdot \rho_w \cdot V_w; \quad (7)$$

Q_7 – теплообмен в помещении, Вт:

$$Q_7 = -Q_4; \quad (8)$$

Q_8 – внешний теплообмен, Вт:

$$Q_8 = \pm \left[\frac{t_{2,i} + t_{2,i+1}}{2} - \frac{t_{out,i} + t_{out,i+1}}{2} \right] \cdot \alpha_{out} \cdot \Delta\tau \cdot P_{out} \cdot H; \quad (9)$$

$\frac{t_{2,i} - t_{1,i}}{2} \cdot \lambda_w = \pm \alpha_{out} \cdot (t_{out,i} - t_{2,i})$ – баланс тепловых потоков на внешней границе.

Разработанная математическая модель позволяет определять температуру внутреннего воздуха помещения, температуры внутренней и наружной поверхностей ограждающих конструкций в любой момент времени. Зная прогнозируемую температуру наружного воздуха, а также режим работы помещения, здания или сооружения (например, время работы персонала в общественных зданиях или увеличения наплыва посетителей), математическая модель позволяет определять величины тепловых потоков, проходящих через ограждения, и оптимизировать режим управления системами обеспечения микроклимата зданий и сооружений – систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

В дальнейшем разработанная модель будет дополняться, чтобы учесть различные факторы изменения микроклимата в зданиях и сооружениях, а именно:

- особенности тепловых потоков через остекление;
- воздухораспределение и вентиляционные потоки;
- инфильтрацию через неплотности наружных ограждений;
- лучистый теплообмен;
- процессы массопереноса влажного воздуха.

На основании предложенного алгоритма и математической модели будет разработано программное обеспечение для автоматического расчета и подбора климатического оборудования, а также управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Оно позволит инженерам быстро и качественно проектировать системы обеспечения микроклимата при строительстве или реконструкции зданий Санкт-Петербурга, сохраняя их исторический облик.

Для разработки такого программного обеспечения необходимо иметь полную и обширную базу климатического оборудования, которая должна постоянно пополняться новыми вариантами (рис. 1).

| A | B | C | D | E | F | G | H | | | I | J |
|----|--------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------------|------|-----|---|---|
| | | | | | | | Габаритные размеры, мм | | | | |
| № | Наименование | Холодопроизводительность, кВт | Теплопроизводительность, кВт | Потребл. мощность, охлаждение, кВт | Потребл. мощность, обогрев, кВт | Класс энергоэффективности | A | B | A | | |
| 1 | Carrier 42QHM009ES | 2,6 | 3,9 | 0,58 | 0,95 | A / A | 315 | 990 | 218 | | |
| 2 | Carrier 42QHM012ES | 3,5 | 3,9 | 0,9 | 0,95 | A / A | 315 | 990 | 218 | | |
| 3 | Carrier 42QHM018ES | 5,2 | 5,6 | 1,37 | 1,6 | A / A | 343 | 1186 | 258 | | |
| 4 | Carrier 42QHM024ES | 7 | 7,6 | 1,89 | 1,89 | A / B | 343 | 1186 | 258 | | |
| 5 | Carrier 42QHC009DS | 2,7 | 2,9 | 0,82 | 0,78 | A / A | 291 | 730 | 192 | | |
| 6 | Carrier 42QHC012DS | 3,5 | 3,8 | 1,25 | 1,12 | A / A | 300 | 812 | 192 | | |
| 7 | Carrier 42QHC018DS | 5,2 | 5,5 | 1,63 | 1,72 | A / A | 319 | 973 | 218 | | |
| 8 | Carrier 42QHC024DS | 6,4 | 7 | 2,06 | 2,12 | A / A | 338 | 1082 | 225 | | |
| 9 | Carrier 42UQV025M | 2,5 | 3,2 | 0,77 | 0,89 | A / A | 250 | 740 | 210 | | |
| 10 | Carrier 42UQV035M | 3,5 | 4,2 | 1,09 | 1,15 | A / A | 275 | 790 | 235 | | |
| 11 | Carrier 42UQV050M | 5 | 5,8 | 1,51 | 1,6 | A / A | 320 | 1050 | 238 | | |
| 12 | Carrier 42UQV060M | 6 | 7 | 1,99 | 2,18 | B / C | 320 | 1050 | 238 | | |

Рис. 1. Фрагмент базы данных оборудования систем обеспечения микроклимата

Результаты

В настоящий момент на базе учебной лаборатории кафедры инженерного проектирования Университета ИТМО подготовлен экспериментальный стенд для оценки энергетической эффективности систем обеспечения микроклимата. Он позволяет провести экспериментальное исследование для проверки адекватности разработанной методики оптимизации систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработать его методику, а также методические указания для лабораторного практикума для бакалавров и магистров.

В результате проведенного исследования была достигнута цель и решены поставленные задачи. Основными результатами исследования являются:

- разработка алгоритма оптимизации технических решений для систем обеспечения микроклимата помещений общественных зданий;
- разработка математической модели тепломассопереноса в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;
- создание базы данных оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;
- разработка экспериментального стенда для проведения исследований;
- подготовка к проведению экспериментального исследования для проверки адекватности разработанной методики.

Публикации

1. *Shilin A.S. et al.* Hydrodynamic calculation of rotary regenerative heat exchanger // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1. P. 10–15.
2. *Шилин А.С., Лысев В.И.* Направления повышения энергоэффективности зданий и сооружений // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». 2017. № 2 (26). С. 18–25.

Литература

1. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М., 2013. – 16 с.
2. Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2009. М., 2012. – 96 с.



Щербинин Дмитрий Павлович
Факультет фотоники и оптоинформатики
E-mail: shcherbinin.dmitrij@gmail.com

УПРАВЛЯЕМОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ РАССЕЙЯНИЕ СВЕТА В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С ЗОЛОТЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Д.П. Щербинин

Научный руководитель – старший научный сотрудник Е.А. Коншина

В работе проводилось сравнение оптических и динамических характеристик светорассеивающих жидкокристаллических (ЖК) ячеек с различными граничными условиями при использовании золотых наноструктур. Было показано, что ослабление оптического пропускания зависит от полярности приложенного напряжения. Максимальное ослабление достигалось с анодом в виде электрода с золотыми наночастицами. Было установлено, что с помощью высокочастотного поля происходит ускорение переключения из рассеивающего в прозрачное состояние практически в восемь раз.

Проект направлен на решение задачи ускорения переключения оптического пропускания нематических жидких кристаллов из состояния поляризационно независимого динамического рассеяния света в прозрачное с максимальным его пропусканием.

Задачи:

– исследование времени переключения динамического рассеяния света в нематических ЖК-ячейках из рассеивающего в прозрачное состояние при использовании высокочастотных полей;

– исследование структур: прозрачного электрода, диэлектрика, металлических наночастиц – и их влияния на время переключения динамического рассеяния света в нематических ЖК-ячейках с отрицательной диэлектрической анизотропией в результате релаксации под действием упругих сил.

Проблема управляемого ослабления оптического излучения в широкой области спектра с высоким контрастом, быстроедействием и поляризационной независимостью остается актуальной для оптических технологий, включая телекоммуникационные и дисплейные технологии. В настоящее время разработан и реализован ряд ЖК-технологий, позволяющих достичь приемлемого времени переключения поля директора (не более одной миллисекунды), например, с помощью ЖК-технологии с использованием твистовых нематиков [1] и ЖК-смесей с аномально низкой вязкостью [2] технологии планарного переключения *IPS (In-plane switching)* [3]. Однако главным недостатком этих методов

является их поляризационная зависимость. Вместе с тем поляризационно-независимое электроуправляемое ослабления пропускания может быть получено путем реализации эффекта динамического рассеяния света (ДРС) в жидких кристаллах. Рассеяние в нематическом жидком кристалле связано с вариациями показателя преломления в локализованных доменах, возникающих при приложении внешнего электрического поля. В последние годы возник интерес к эффекту динамического рассеяния света, что связано с перспективностью использования данного эффекта для практического применения в оптических устройствах [4–5]. Широкому практическому использованию поляризационно-независимого ДРС-эффекта препятствуют высокие рабочие напряжения и медленная переориентация поля директора после его снятия.

Современный уровень нанотехнологий позволяет получить тонкопленочные наноструктуры с заданными параметрами: проводимостью, спектральными свойствами, поверхностной напряженностью и работой выхода. Данная экспериментальная работа направлена на решение проблемы ускорения переориентации поля директора в режиме динамического рассеяния света при более низких напряжениях путем получения и оптимизации свойств тонкопленочных наноструктур, содержащих золотые наночастицы на межфазных границах нематического жидкого кристалла, а также путем вариации управления параметрами электрического поля.

Для экспериментальных исследований электрооптических характеристик и объемных свойств жидкого кристалла использовались плоскопараллельные ячейки, собранные из двух прозрачных подложек с заданным зазором между ними, которые заполнялись жидким кристаллом с отрицательной диэлектрической анизотропией. Прозрачные токопроводящие электроды *ITO* осаждались с помощью магнетронного распыления. Поликристаллические слои диоксида кремния получались с помощью лазерного распыления. Массивы металлических наночастиц осаждались резистивным испарением. Для определения аттенюации пропускания в широком спектральном диапазоне измерялись спектры пропускания ЖК-ячеек в прозрачном и рассеивающем состоянии в интервале длин волн 400–1100 нм с помощью спектрофотометра СФ-56 (ЛОМО). Для измерения электрических свойств ЖК-ячеек использовался метод импеданс-спектроскопии, измерения проводились с помощью прецизионного измерителя импеданса *Agilent E4980A*.

Для исследования особенностей динамического рассеяния света в ЖК-ячейках с гранулированными золотыми пленками на одной из межфазных границ были собраны три ячейки. Гибридная тонкопленочная структура состояла из *ITO* электрода, покрытого тонкой пленкой SiO_2 , и островковой пленки золота. Толщина каждого слоя в ЖК-ячейках представлена в Табл. 1. Ячейки заполнялись нематическим жидким кристаллом с отрицательной диэлектрической анизотропией марки ЖК-440. Для ускорения процесса обмена зарядов с внешней цепью *ITO*-электрод на второй подложке ничем не покрывался.

Характеристики несимметричных ЖК-ячеек зависят от полярности приложенного сигнала. На рис. 1 приведены графики пропускания ячеек в зависимости от приложенного напряжения в режиме ДРС для случаев, когда электрод с гибридной наноструктурой выступает в качестве катода и анода.

Из рис. 1 видно, что, если электрод с гибридной наноструктурой служит анодом, в ЖК-ячейке происходит сильное ослабление пропускания. Если этот электрод является катодом, то наблюдается незначительное уменьшение пропускания при увеличении напряжения, а затем оно вновь увеличивается. Просветление может быть связано с падением проводимости ниже критического уровня, необходимого для возникновения электрогидродинамической неустойчивости. Коэффициенты ослабления пропускания при приложении напряжения равного 40 В, а также измеренные значения проводимости приведены в Табл. 2

Таблица 1
Толщина слоев на межфазной границе ЖК-ячейки

| Номер ячейки | Структура | Толщина слоя SiO ₂ , нм | Эффективная толщина слоя Au, нм | Толщина слоя ЖК, мкм |
|--------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | ITO/SiO ₂ /Au/ЖК/ITO | 20 | 40 | 12,3 |
| 2 | ITO/SiO ₂ /Au/ЖК/ITO | 20 | 20 | 12,8 |
| 3 | ITO/SiO ₂ /Au/ЖК/ITO | 35 | 20 | 11,8 |

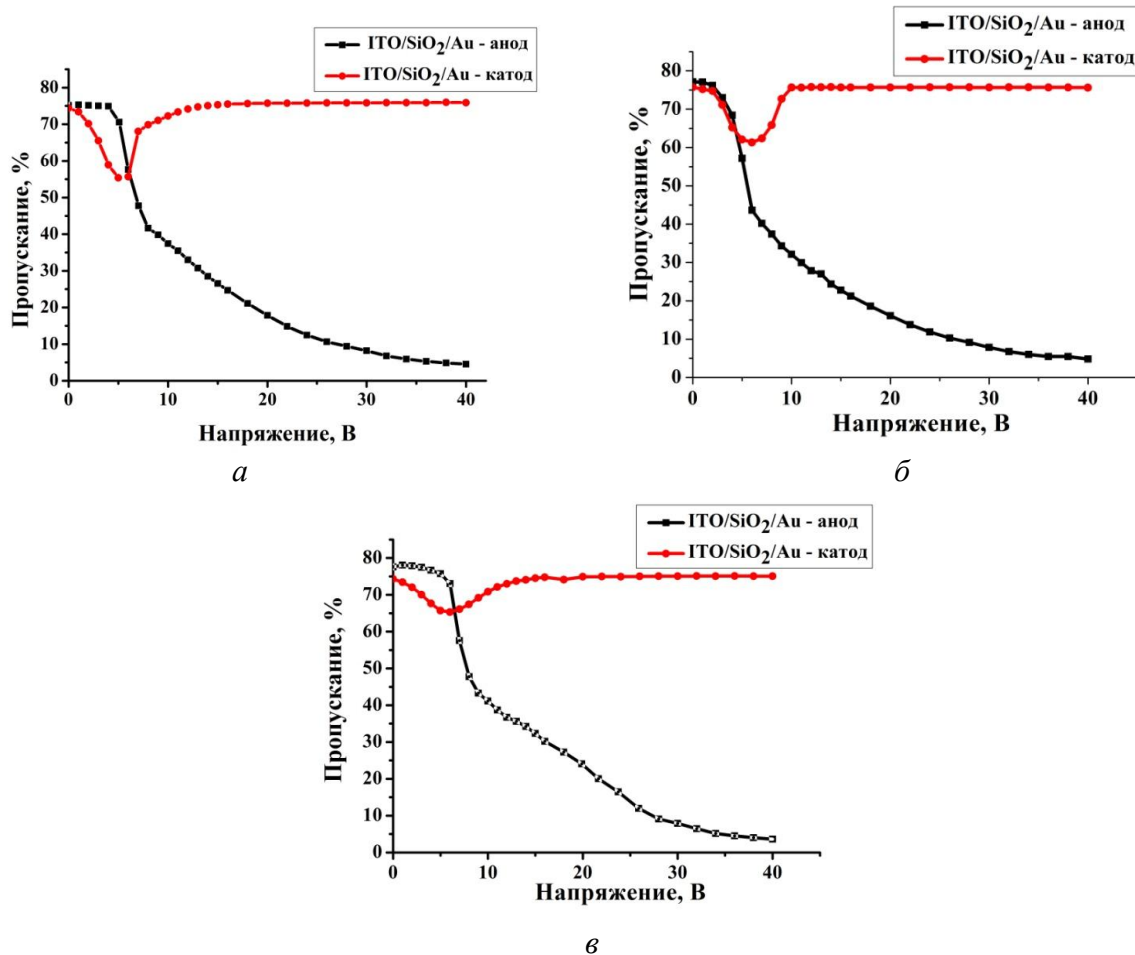


Рис. 1. Зависимость пропускания ЖК-ячейки от напряжения в режиме ДРС при приложении постоянного напряжения разной полярности:
а – ЖК-ячейка № 1; б – № 2; в – № 3

Изучена динамика переключения структур при использовании простого и комбинированного режимов управления. Оптический отклик при приложении постоянного напряжения к электроду с гибридными наноструктурами, выступающему в качестве катода, не наблюдался. На рис. 2 представлены осциллограммы переключения из прозрачного в рассеивающее состояние при приложении постоянного напряжения 60 В к наноструктурированному электроду. В исследуемых структурах это время отличается незначительно и лежит в диапазоне 3,2–3,8 мс.

При использовании простого режима управления переключение из рассеивающего в прозрачное состояние достигалось с помощью снятия внешнего электрического поля. При комбинированном режиме переключение осуществлялось путем приложения высокочастотного поля с частотой 1 кГц.

Таблица 2
Электрооптические характеристики ячеек

| Характеристики ячеек | Номер ячейки | | |
|---|--------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Коэффициент ослабления пропускания ячеек с наноструктурами при напряжении 40 В под положительным потенциалом, дБ | 12,1 | 12,6 | 13,3 |
| Проводимость ячеек с наноструктурами при напряжении 40 В, наноструктурированной электрод выступает в качестве анода, $\times 10^{-8}$ См·м | 1,36 | 0,91 | 0,39 |
| Проводимость ячеек с наноструктурами при напряжении 40 В, наноструктурированной электрод выступает в качестве катода, $\times 10^{-8}$ См·м | 0,31 | 0,07 | 0,07 |
| Время переключения наноструктуры из прозрачного в рассеивающее состояние под положительным потенциалом 60 В, с | 3,3 | 3,8 | 3,2 |
| Время переключения из рассеивающего в прозрачное состояние при снятии напряжения, с | 700 | 292 | 761 |
| Время переключения из рассеивающего в прозрачное состояние при приложении напряжения 60 В, 1 кГц, с | 150 | 80 | 100 |
| Коэффициент ускорения при использовании высокочастотного напряжения. | 4,7 | 3,65 | 7,6 |

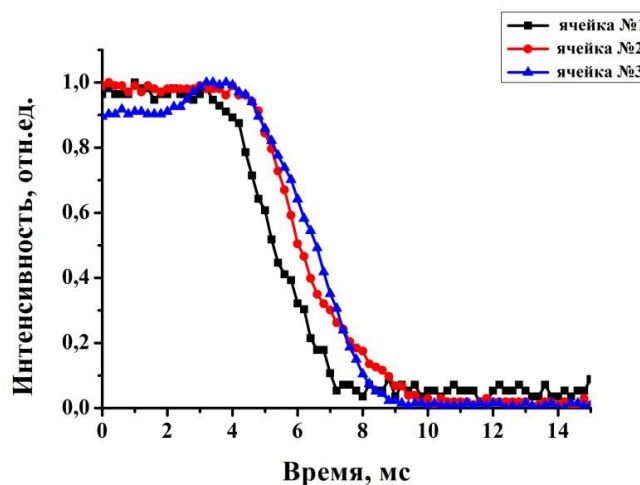


Рис. 2. Осциллограммы спада пропускания ЖК-ячеек в режиме ДРС

Динамические характеристики ячеек с наноструктурированной межфазной границей приведены в Табл. 2. Из полученных данных видно, что использование комбинированного режима приводит к большему ускорению переключения (до семи раз) по сравнению со структурами, описанными в первой части данного проекта (до двух раз). Кроме того, существенно различается время переключения из рассеивающего в прозрачное состояние для трех исследованных ячеек. Наименьшее соответствует структуре с более тонкими слоями SiO_2 и золотой островковой пленкой.

В ходе выполнения работы показано, что при использовании металлических наноструктур на одной из межфазных границ наблюдались несимметричные зависимости пропускания от величины напряжения. При использовании наноструктурированного электрода в качестве анода было зафиксировано падение пропускания ЖК-ячеек и большая проводимость. При смене полярности – ее просветление. Данный эффект может быть

использован в различных затворах и аттенюаторах в средствах передачи и отображения информации. Другой особенностью ЖК-ячеек с наноструктурированными электродами является большое ускорение переключения их в прозрачное состояние. Под действием высокочастотного поля было достигнуто ускорение времени переключения почти в восемь раз по сравнению с естественной релаксацией поля директора.

Публикации

1. *Shcherbinin D.P., Konshina E.A.* Study of dynamic light scattering in nematic liquid crystal and its optical, electrical and switching characteristics // *Liquid Crystals*. 2018. Vol. 45. No 2. P. 292–302.
2. *Shcherbinin D.P. et al.* Influence of barrier effects at interfaces on dynamic scattering of light in a nematic liquid crystal // *Technical Physics*. 2017. Vol. 62. No 9. P. 1385–1392.

Литература

1. *Geis M.W. et al.* 30 to 50 ns liquid-crystal optical switches // *Optics Express*. 2010. Vol. 18. No 18. P. 18886–18893.
2. *Chen H. et al.* Ultra-low viscosity liquid crystal materials // *Optical Materials Express*. 2015. Vol. 5. No 3. P. 655–660.
3. *Hong H.K. et al.* In-plane switching technology for liquid crystal display television // *Journal of Display Technology*. 2007. Vol. 3. No 4. P. 361–370.
4. *Geis M.W. et al.* Broadband optical switch based on liquid crystal dynamic scattering // *Optics Express*. 2016. Vol. 24. No 13. P. 13812–13823.
5. *Serak S.V. et al.* High contrast switching of transmission due to electrohydrodynamic effect in stacked thin systems of liquid crystals // *Applied Optics*. 2016. Vol. 55. No 30. P. 8506–8512.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Разработка и научное обоснование способа производства экструдированных картофельных снеков, обогащенных белками и пищевыми волокнами, в одношнековом экструдере <i>О.И. Аксенова</i> | 4 |
| Регулирование сенсорного профиля пшеничного кваса технологическими факторами <i>М.С. Алексеева</i> | 8 |
| Электрофизические и магнитные свойства сегнетоэлектрической керамики на основе твердого раствора ниобата бария-стронция, легированного редкоземельными металлами <i>А.С. Анохин</i> | 12 |
| Оценка эффективности мутации <i>heavy-tailed</i> на примере задачи <i>XdivK</i> <i>Д.С. Антипов</i> | 16 |
| Алгоритмы адаптации с ускоренной сходимостью в системе управления соотношением «воздух – топливо» для инжекторных двигателей <i>М.Е. Беляев</i> | 18 |
| Метод восстановления оптических характеристик для среды с объемным рассеянием <i>Н.Н. Богданов</i> | 22 |
| Исследование и разработка системы визуализации ионизирующего излучения на основе неорганического сцинтиллятора и кодирующей апертуры <i>А.В. Васильева</i> | 25 |
| Применение состояний-ловушек в системе квантовой коммуникации на боковых частотах модулированного излучения <i>А.А. Гайдаш</i> | 30 |
| Анализ применения методов оценки спектральных характеристик трехмерного морского волнения по измерениям, выполненным волномерными буйами <i>К.А. Глеб</i> | 32 |
| Разработка микрообъективов с полимерными элементами <i>А.С. Екименкова</i> | 37 |
| Исследование возможности применения интеркалированного хлоридом железа (III) малослойного графена в терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени <i>М.О. Жукова</i> | 41 |
| Разработка новых технологических методик обеспечения надежности и стабильности выходных параметров микроэлектромеханических систем <i>М.Е. Калинин</i> | 45 |
| Исследование особенностей излучательных свойств ансамблей спазеров <i>А.Н. Камалиева, Н.А. Торопов</i> | 48 |
| Исследование и разработка распределенных оптико-электронных каналов с ретрорефлекторами для контроля смещений элементов протяженных конструкций <i>М.А. Клещенок</i> | 53 |
| Разработка методов анализа статики и динамики оболочечных чувствительных элементов микроэлектромеханических систем <i>А.С. Козлов</i> | 59 |

| | |
|---|-----|
| Комплексное исследование распределения яркости в условиях городской среды <i>С.В. Колгушкина</i> | 63 |
| Разработка и создание перестраиваемого узкополосного спектрального фильтра на основе волоконных решеток Брэгга <i>К.А. Коннов</i> | 68 |
| Исследование процесса и разработка аппарата для проведения электроконтактной выпечки хлебобулочных изделий <i>Б.А. Кулишов</i> | 72 |
| Увеличение надежности работы основных узлов и деталей машин объемного действия при наличии в составе рабочего вещества коррозионно-активных составляющих <i>А.С. Маковеева</i> | 79 |
| Анализ методов управления последовательностью фемтосекундных импульсов с терагерцовой частотой повторения <i>М.В. Мельник</i> | 84 |
| Синтез алгоритмов адаптивного слежения с ускоренной параметрической сходимостью и их реализация на промышленных контроллерах <i>А.С. Милушин</i> | 90 |
| Анализ инструментов визуализации результатов патентных исследований и построения патентных ландшафтов для принятия управленческих решений стратегического характера в сфере инновационной деятельности <i>А.С. Николаев</i> | 93 |
| Разработка рекуперационного механизма на основе упругих элементов <i>К.А. Нуждин</i> | 98 |
| Исследование и разработка системы проведения постинцидентного внутреннего аудита средств вычислительной техники <i>И.С. Пантюхин</i> | 104 |
| Алгоритмы прямой адаптивной компенсации детерминированных возмущений в неустойчивых системах с запаздыванием в канале управления <i>А.В. Парамонов</i> | 107 |
| Оптически активные полупроводниковые нанопружины для применения в химических сенсорах <i>Т.П. Перезябова</i> | 112 |
| Автоматизация процессов тестирования и отладки встраиваемых вычислительных систем с использованием уровневых моделей <i>В.Ю. Пинкевич</i> | 117 |
| Исследование характеристик координатных фотоприемников <i>К.С. Поваров</i> | 121 |
| Разработка функциональной схемы приема сигналов лидара и метода их анализа <i>Е.А. Селедкина</i> | 125 |
| Исключение влияния нелинейного элемента в цепи основной обратной связи <i>М.М. Синетова</i> | 130 |
| Исследование и разработка многоканального оптико-электронного комплекса для контроля линейных перемещений элементов планарных инженерных и строительных сооружений <i>Е.А. Сычева</i> | 136 |

| | |
|--|-----|
| Наблюдатели потока, положения и скорости вращения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами <i>Е.С. Титова</i> | 141 |
| Разработка метода увеличения глубины резкости изображений, формируемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля <i>М.А. Фролова</i> | 146 |
| Разработка программного комплекса для предупреждения симптомов аллергии на пыльцу <i>Н.Е. Ханжина</i> | 150 |
| Фазовые переходы в неравновесных системах в условиях неоднородного уширения <i>Д.В. Царев</i> | 155 |
| Автоматический регулятор синхронного генератора для компенсации возмущений в условиях коммуникационного запаздывания в энергосети <i>Ю.В. Чугина</i> | 159 |
| Исследование и обоснование рецептур продуктов на зерновой основе функционального назначения <i>А.С. Шаталова</i> | 165 |
| Методы и алгоритмы формирования энергетически эффективных систем обеспечения микроклимата в общественных зданиях Санкт-Петербурга <i>А.С. Шилин</i> | 170 |
| Управляемое динамическое рассеяние света в жидкокристаллических структурах с золотыми наночастицами <i>Д.П. Щербинин</i> | 174 |

Сборник трудов аспирантов Университета ИТМО, победителей конкурса грантов Правительства Санкт-Петербурга / Под редакцией проф. В.О. Никифорова. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 181 с.

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

Под редакцией проф. В.О. Никифорова
Дизайн обложки А.В. Тикка
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Редакторы: А.В. Бутина, И.А. Лапшина
Подписано в печать 14.06.2019
Заказ № 4329
Тираж 100 экз.