



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

2



# Альманах научных работ молодых ученых

2019

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**АЛЬМАНАХ  
НАУЧНЫХ РАБОТ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
Университета ИТМО**

**Том 2**



**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2019**

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 2. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 175 с.

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные на XLVIII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематикам: безопасность информационных технологий; системы управления и робототехника.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

##### **Председатель редколлегии:**

*Бобцов Алексей Алексеевич*

доктор технических наук, профессор, директор мегафакультета компьютерных технологий и управления Университета ИТМО.

##### **Члены редколлегии:**

*Кустарев Павел Валерьевич*

кандидат технических наук, декан факультета программной инженерии и компьютерной техники

*Заколдаев Данил Анатольевич*

кандидат технических наук, доцент, декан факультета безопасности информационных технологий

*Муромцев Дмитрий Ильич*

кандидат технических наук, доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники

*Беззатеев Сергей Валентинович*

доктор технических наук, доцент, профессор факультета безопасности информационных технологий

*Ловлин Сергей Юрьевич*

кандидат технических наук, доцент факультета систем управления и робототехники

*Громов Владислав Сергеевич*

кандидат технических наук, доцент факультета систем управления и робототехники

ISBN 978-5-7577-0606-1

ISBN 978-5-7577-0608-5 (Том 2)



**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.

© Университет ИТМО, 2019

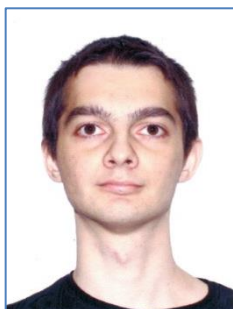
© Авторы, 2019

## **ВВЕДЕНИЕ**

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные 29 января – 1 февраля 2019 года на XLVIII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО по тематикам: безопасность информационных технологий; системы управления и робототехника.

Конференция проводится в целях усиления интегрирующей роли университета в области научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники и ознакомления научной общественности с результатами исследований, выполненных в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, программы развития Университета ИТМО на 2009–2018 годы, программы повышения конкурентоспособности Университета ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг., Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», грантов Президента РФ для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ, грантов РФФИ, РГНФ, РНФ и Правительства РФ (по постановлению № 220 от 09.04.2010 г.) и по инициативным научно-исследовательским проектам, проводимым учеными, преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами, магистрантами и студентами университета, в том числе в содружестве с предприятиями и организациями Санкт-Петербурга, а также с целью повышения эффективности научно-исследовательской деятельности и ее вклада в повышение качества подготовки специалистов.

**НАПРАВЛЕНИЕ**  
**БЕЗОПАСНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**



**Большаков Владимир Олегович**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N4260

Направление подготовки: 11.04.03 – Конструирование и технология электронных средств

e-mail: lion080895@gmail.com



**Жарова Юлия Александровна**

Год рождения: 1979

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.ф.-м.н., доцент

e-mail: piloguina@mail.ioffe.ru

УДК 621.315.592

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА  
НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ**

**Большаков В.О.**

**Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Жарова Ю.А.**

В работе исследованы с помощью эллисометрии образцы кремния с осаженными наночастицами серебра, данный образец представляет интерес благодаря наличию плазмонного резонанса частиц серебра.

**Ключевые слова:** плазмон, наночастицы серебра, кремний, плазмонный резонанс, эллипсометрия.

Наночастицы серебра обладают уникальными оптическими свойствами, обусловленными резонансными эффектами, которые возникают благодаря наличию в них электронов проводимости. Эти электроны при взаимодействии с фотонами могут создавать локализацию электрических полей на границах раздела с окружающей средой. Большой интерес для практических применений представляют наноструктуры из серебра (Ag), если они осаждаются на подложках кремния (Si). Взаимодействие света с наноструктурами может быть описано с помощью различных моделей, а для их экспериментального наблюдения должны быть использованы высокочувствительные методы, к которым относятся эллипсометрия [1].

На рис. 1 представлена морфология нескольких исследуемых образцов, полученных химическим осаждением серебра из раствора  $AgNO_3$ . Они различаются плотностью расположения частиц и их высотой.

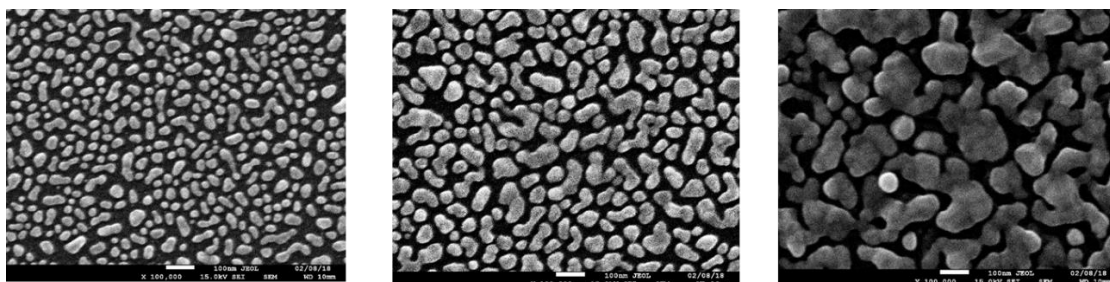


Рис. 1. Снимки РЭМ-образцов слоев различной морфологии, осажденных химическим методом из раствора  $AgNO_3$ , размер частиц от 10 до 70 нм

С помощью эллипсометра измеряются углы  $\Delta$  и  $\Psi$ , где  $\Psi$  – отношение амплитудных коэффициентов отражения  $R_p/R_s$ , измеренных при  $p$ - и  $s$ -поляризации света, а  $\Delta$  – сдвиг фазы между ними, из которых используется основное уравнение эллипсометрии (1), а также модель эффективной подложки, определяющая диэлектрическую функцию исследуемого образца. Что позволяет из макроскопической информации из эллипсометрии описывать микроскопические особенности исследуемой структуры в виде определения диэлектрической функции  $\epsilon$  (совокупность слоя Ag на подложке Si).

$$\rho = R_p/R_s = \tan(\psi) \cdot \exp(i\Delta). \quad (1)$$

Далее были получены на спектрометре  $\Delta$  и  $\Psi$  углы образцов. Для дальнейшего исследования необходимо рассчитать псевдоэлектрические функции для анализа образцов. На рис. 2, а, видно, что от морфологии изменяется как  $\epsilon_1$  так и  $\epsilon_2$ . Но виден пик выделенный линией на графике  $\epsilon_1$  в положении 3,85 эВ независящий от морфологии и толщины серебра.

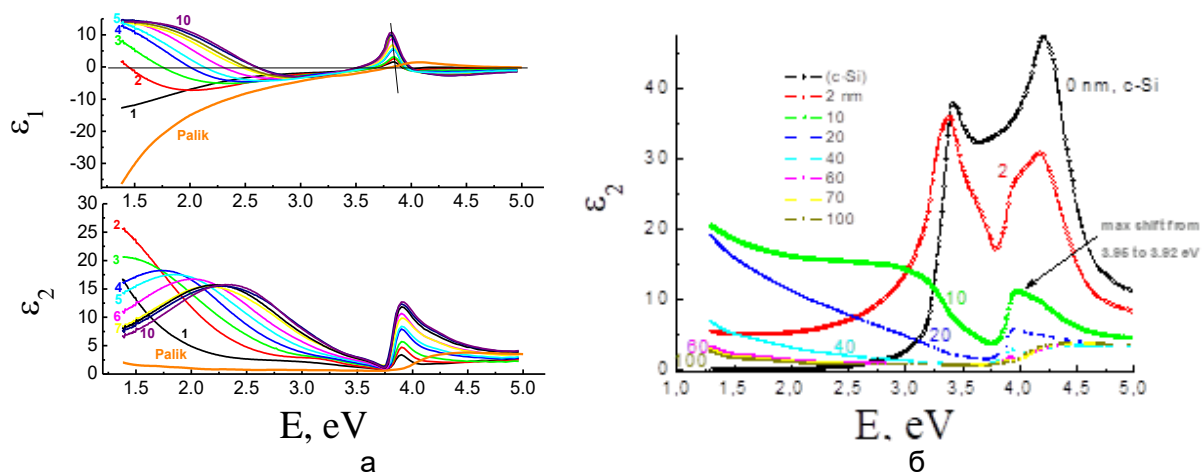


Рис. 2. Графики псеводиэлектрических функций образцов (а) и рассчитанных псеводиэлектрических функций серебра (б)

Так как этот пик имеет явно резонансную природу, были проведены расчеты по его выявлению в слоях серебра. Обычно исследуют мнимую часть, так как она в большей степени характеризует поглощение, а резонанс является источником последнего. Для этого была использована модель эффективной подложки. Серебро постепенно наращивалось на поверхности кремния, и можно было оценить порог, когда происходит экранирование оптических характеристик подложки: свыше 100 нм для слоя Ag подложки Si характеристиками отражающей структуры, как видно из рис. 2, б, характер формирования и положение пика  $E=3,9$  эВ не зависят от оптических характеристик Si.

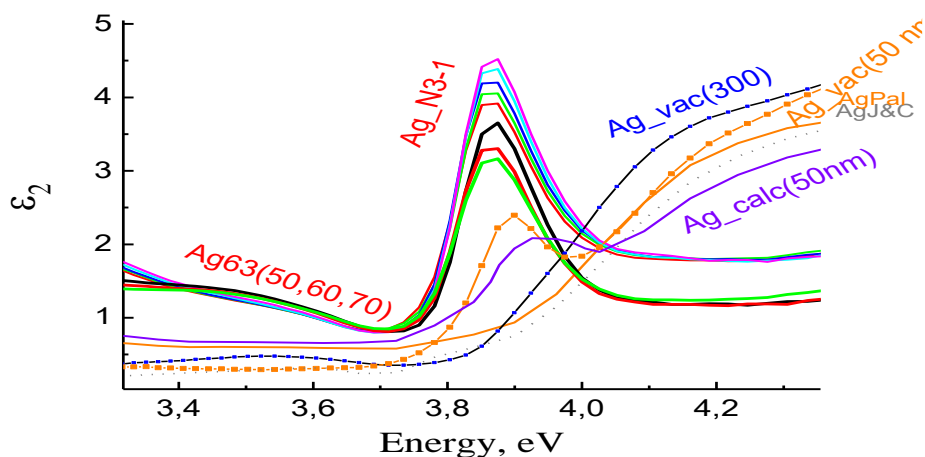


Рис. 3. График рассчитанных и измеренных псеводиэлектрических функций серебра

Из эксперимента и расчетов проявляется пик в области 3,9 эВ и сохраняет свое положение при изменении морфологии и угла падения света. Это объясняется наличием объемного плазмонного резонанса в продольной моде падающего наклонного пучка света. [2] После идентификации этого плазмонного резонанса были сравнены расчеты и эксперимент по сплошным пленкам и с наночастицами серебра. Положение резонанса слоя наночастиц по сравнению со сплошными слоями также не зависит от угла падения и превышает амплитуду максимально возможного расчетного пика (calc 50 нм на рис. 3) более чем в три раза.

В результате исследования были:

1. проведены эллипсометрические измерения слоев наночастиц Ag различной морфологии;
2. для расчета и интерпретации эксперимента использована модель эффективной подложки, в рамках которой определяются псевдодиелектрические функции  $\epsilon_2$  (реальная и мнимая части);
3. в расчетных спектрах  $\epsilon_2$  для толщины Ag слоя 5–60 нм на подложках Si двух типов выявлен резонансный пик, обусловленный объемным плазмонным резонансом, возникающий в виде продольной моды, распространяющейся вдоль плоскости подложки;
4. по сравнению с расчетами для сплошных слоев, этот резонансный пик (наблюдаемый и в экспериментах), для слоя наночастиц Ag по амплитуде увеличивается в три раза. Этот эффект можно объяснить возбуждением локализованных зарядов на боковых границах наночастиц Ag.

#### Литература

1. Швец В.А., Спесивцев Е.В. Учебно-методическое пособие по методу эллипсометрии. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – 87 с.
2. Wang Y., Plummer E.W. & Kempa K. Foundations of Plasmonics // Advances in Physics. – 2011. – V. 60(5). – P. 799–898.



**Гайфулина Диана Альбертовна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N4259

Направление подготовки: 10.04.01 – Информационная безопасность

e-mail: diana-lina95@yandex.ru

**Хаванская Эльвира Рустамовна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N4259

Направление подготовки: 10.04.01 – Информационная безопасность

e-mail: elvirochka1995@mail.ru

**Волошина Наталия Викторовна**

Год рождения: 1976

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., доцент

e-mail: nataliv@yandex.ru

УДК 004.056

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ  
КЛАССИФИКАЦИИ ВЕБ-СТРАНИЦ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕЖЕЛАТЕЛЬНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ****Гайфулина Д.А., Хаванская Э.Р.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Волошина Н.В.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

В работе проведен анализ методов машинного обучения с целью повышения качества классификации веб-страниц для выявления нежелательной информации в сети Интернет. Дано понятие нежелательной информации. Рассмотрены основные этапы и алгоритмы классификации веб-страниц с использованием методов машинного обучения. Приведены результаты эксперимента оценки качества классификации веб-страниц, содержащих нежелательную информацию, на основе исследуемых алгоритмов машинного обучения.

**Ключевые слова:** нежелательная информация, классификация веб-страниц, машинное обучение, классификация текстов, защита от нежелательной информации.

Нежелательная информация представляет собой отдельный информационный объект и (или) совокупность объектов в информационном пространстве, содержащих противоправную, сомнительную, вредоносную информацию. К нежелательной информации можно отнести как запрещенную информацию, виды которой устанавливаются законодательством Российской Федерации, а также иную информацию, определяемую самим пользователем. Организацию защиты от нежелательной информации можно разделить на два

основных направления: ограждение несовершеннолетних от нежелательных материалов и блокировку контента, нарушающего законодательство (рис. 1). Данные мероприятия осложняются большими объемами информации в сети Интернет, высокой изменчивостью содержимого сайтов и сложностью их построения, что требует использования не только «черных» и «белых» списков, но и более усовершенствованных методов. Для определения данных видов информации необходимы автоматические системы поиска и анализа.

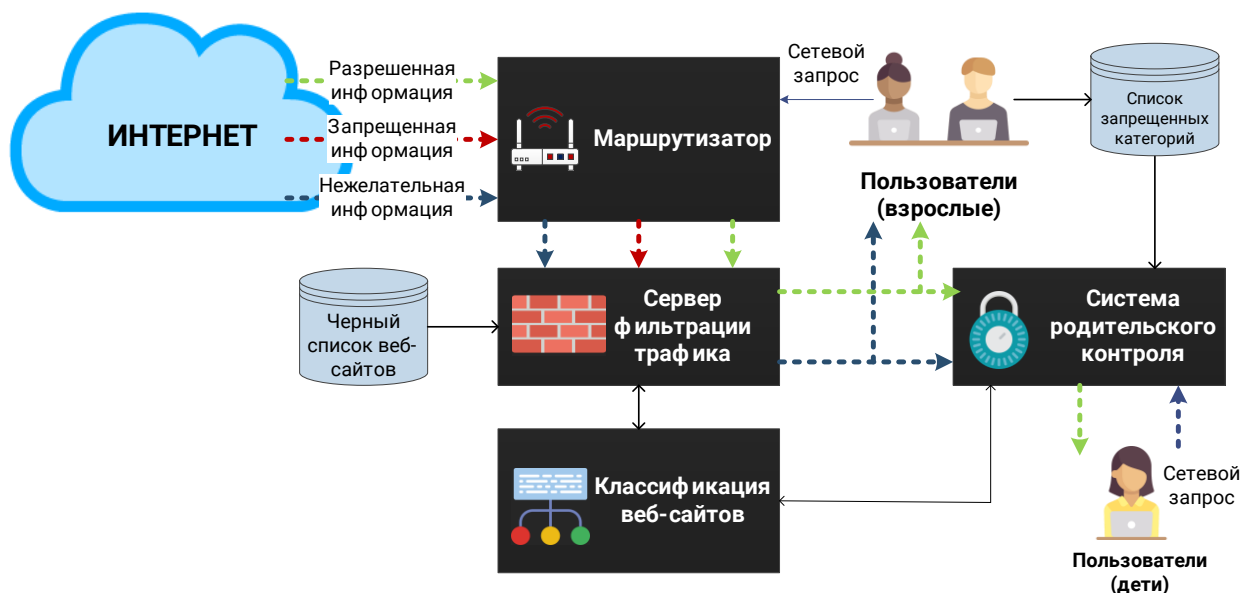


Рис. 1. Место и роль классификации веб-страниц

Целью данной работы являлся анализ методов машинного обучения в задачах классификации веб-страниц для выявления нежелательной информации в сети Интернет.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. изучить основные этапы классификации веб-страниц;
2. провести анализ методов машинного обучения в рамках задачи классификации;
3. определить критерии оценки методов машинного обучения;
4. составить план и провести эксперимент для оценки алгоритмов классификации веб-страниц с использованием методов машинного обучения.

Основными подходами к классификации веб-страниц являются:

1. анализ URL-адреса;
2. анализ HTML-тегов;
3. анализ объектов на странице, не связанных с текстом (например, медиаконтент);
4. анализ текстового содержимого [1, 2].

Задача классификации веб-страниц может быть разбита на два основных этапа:

1. предобработка/индексация – отображение текста веб-страницы на его логическое представление, например, вектор весов, который затем подается на вход алгоритму классификации;
2. классификация/обучение – этап классификации веб-страницы или обучения на множестве текстов веб-страниц, основанный на полученном логическом представлении.

На первом этапе текст веб-страницы, имеющий вид последовательности символов, преобразуется к виду, пригодному для алгоритмов машинного обучения, называемому пространством признаков [1]. Схема формирования пространства признаков текста веб-страницы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Предобработка данных веб-страницы

В результате данной предобработки текст представляется в виде мультимножества термов (слов), каждому из которых сопоставлен некоторый вес с использованием меры TF-IDF (TF, term frequency, IDF, inverse document frequency). TF-IDF – это статистическая мера, используемая для оценки важности слова в контексте текста веб-страницы [3].

Метрика  $TF$  позволяет оценить важность термина  $t$  в пределах отдельной веб-страницы  $s$  и представляет собой отношение числа вхождений термина  $n_t$  к общему числу термов текста веб-страницы  $\sum_k n_k$ :

$$TF(t_i, s_j) = \frac{n_t}{\sum_k n_k}.$$

Метрика  $IDF$  является инверсией частоты, с которой некоторое слово встречается в исследуемой выборке веб-сайтов и позволяет уменьшить вес широкоупотребительных слов. Метрика  $IDF$  рассчитывается как логарифм отношения количества веб-страниц  $|S|$  к количеству веб-страниц, на которых данное слово встречается  $|\{s_i \in S\}|$ :

$$IDF(t_i, S) = \log \frac{|S|}{|\{s_i \in S\}|}.$$

Мера  $TF-IDF$  является произведением двух сомножителей и является основным показателем по определению значимости слова для конкретной категории веб-сайтов. Вес некоторого слова пропорционален количеству употребления этого слова в документе, и обратно пропорционален частоте употребления слова в других документах коллекции:

$$wt_{ij} = TF(t_i, s_j) \times IDF(t_i, S).$$

Вторым этапом является построение классифицирующей функции при помощи обучающей выборки веб-страниц. Алгоритмы машинного обучения, применяемые на данном этапе, можно описать как обучение целевой функции, которая наилучшим образом соотносит входные переменные и выходную переменную [4]. При решении задачи классификации текстового содержимого входными параметрами для всех методов интеллектуального анализа являются вектора данных, отражающие текстовое содержимое сайтов, а также заранее определенное количество категорий, к которым необходимо их отнести. Выходным параметром является категория анализируемой веб-страницы.

В рамках исследования рассмотрены следующие методы машинного обучения для решения задачи классификации веб-сайтов по текстовому содержимому: деревья принятия решений, метод опорных векторов, наивный байесовский классификатор и логистическая регрессия. Выбор классификаторов был сделан на основании изученных работ по классификации, в которых данные методы себя хорошо зарекомендовали [2, 3, 5]. Для анализа данных алгоритмов в работе предложено провести их сравнение по наличию следующих характеристик, принимаемых за достоинства их использования:

- высокая скорость обучения классификатора;
- простота интерпретации результатов классификации;
- необходимость малой выборки исходных данных для обучения классификатора;
- возможность работы с большим количеством категорий и признаков (многоклассовая классификация).

В таблице представлен сравнительный анализ методов машинного обучения для классификации веб-страниц.

Таблица. Анализ методов машинного обучения в задачах классификации

Название метода	Высокая скорость обучения	Простота интерпретации результатов	Малая выборка данных	Большое число категорий и признаков
Деревья решений	+	+	–	+
Опорные вектора	–	+	+	–
Байесовские сети	+	+	+	–
Логистическая регрессия	+	+	–	+

Для оценки качества данных классификаторов используются следующие критерии:

1. количество веб-страниц, однозначно принадлежащих категории, (True Positive, TP);
2. количество веб-страниц, ошибочно отнесенных к истинной категории – ошибка первого рода (False Positive, FP);
3. количество веб-страниц, однозначно не принадлежащих категории, (True Negative, TN);
4. количество веб-страниц, ошибочно отнесенных к ложной категории – ошибка второго рода (False Negative, FN).

На основании данных критериев вводятся численные метрики оценки: аккуратность, полнота, точность и F-мера [3]. Аккуратность (accuracy) определяется отношением количества веб-страниц, по которым классификатор принял правильное решение ( $TP+TN$ ), к общему количеству  $N$  сайтов  $k$  категорий. Точность (precision) определяется как количество веб-страниц, действительно принадлежащих истинной категории ( $TP$ ), относительно всех веб-страниц, которые система отнесла к данной категории ( $TP+FP$ ). Полнота (recall)  $R$  определяется как количество веб-страниц, действительно принадлежащих истинной категории ( $TP$ ), относительно всех веб-страниц этой категории ( $TP+FN$ ). F-мера – это метрика, объединяющая в себе информацию о точности и полноте, представляющая собой гармоническое среднее.

Для оценки алгоритмов машинного обучения в рамках задачи классификации был проведен эксперимент, схема которого отображена на рис. 3.

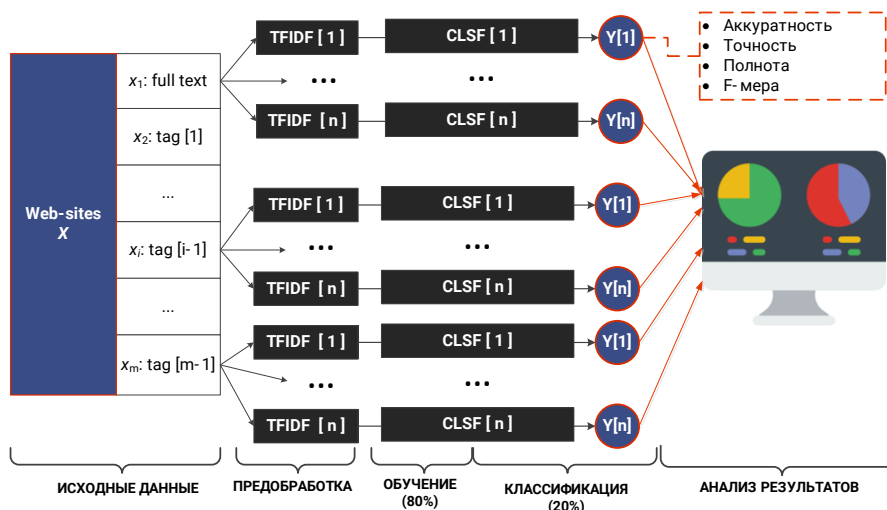


Рис. 3. Эксперимент по оценке алгоритмов классификации

Исходными данными является выборка веб-страниц, 80% которой является обучающей, а 20% – тестовой. Каждая веб-страница может быть представлена в виде набора характеристик, в качестве которых представлен текст веб-сайта, как полностью, так и в определенных HTML-тегах  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , где  $m$  – количество характеристик веб-страницы.

В рамках решения задачи классификации веб-страницы необходимо сопоставить каждому метку категории, т.е. существует некоторое отображение  $X \rightarrow Y$ , где  $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ , где  $k$  – количество категорий, на основании известных пар  $(x_i, y_j)$  для объектов обучающей выборки. В качестве элементарных классификаторов используется множество  $CLSF=\{CLSF_1, CLSF_2, \dots, CLSF_n\}$ ,  $CLSF: X \rightarrow Y$ , где  $n$  – число классификаторов.

В рамках описанного эксперимента была проанализирована выборка из 79063-х веб-страниц следующих категорий нежелательной информации: наркотики/алкоголь, религия, порнография, агрессия, азартные игры, оружие. Текст веб-страниц был собран по тринадцати характеристикам, таким как полный текст веб-страницы и данные HTML-тегов: MetaDescription, Title, P, A, B, Span, MetaContent, H1, H2, H3, DIV, Link.

Результаты качества классификации тестовой выборки по аккуратности представлены на рис. 4, по F-мере на рис. 5.

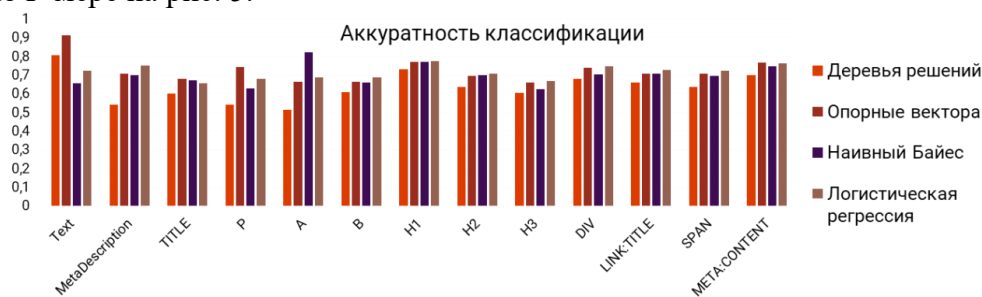


Рис 4. Оценка качества классификации по аккуратности

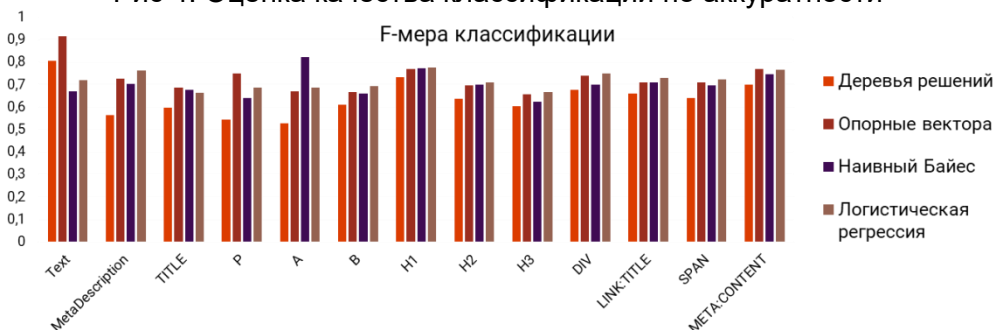


Рис. 5. Оценка качества классификации по F-мере

По полученным результатам можно отметить, что метод опорных векторов дает более высокие результаты качества классификации для полного текста страницы. Деревья решений дают второй по качеству результат классификации, но не очень хорошо проявляют себя при классификации текстов тегов, по сравнению с наивным байесовским классификатором и логистической регрессией. Таким образом, можно заключить, что использование для классификации веб-страницы конкретного классификатора не является достаточным для более точного определения категории нежелательной информации.

В направлении дальнейшей работы предлагается разработать комплексный алгоритм классификации веб-страниц, который позволит использовать технологию бэггинга. Бэггинг – технология классификации, где все элементарные классификаторы обучаются и работают параллельно, независимо друг от друга. Идея заключается в том, что классификаторы не исправляют ошибки друг друга, а компенсируют их при голосовании.

В данном случае производится обучение каждого элементарного классификатора на подмножестве характеристик веб-страницы  $X_i, i \in [1, m]$ . По результатам взвешенного голосования определяются веса классификаторов  $w$ :

$$W_i = \{w_i^{CLSF1}, w_i^{CLSF2}, \dots, w_i^{CLSF_n}\}.$$

На этапе конечной классификации выбирается решение классификатора с наибольшим весом для данной характеристики. По результатам классификации каждой характеристики веб-страницы производится взвешенное голосование и определение категории веб-страницы. Схема описанного алгоритма представлена на рис. 6.

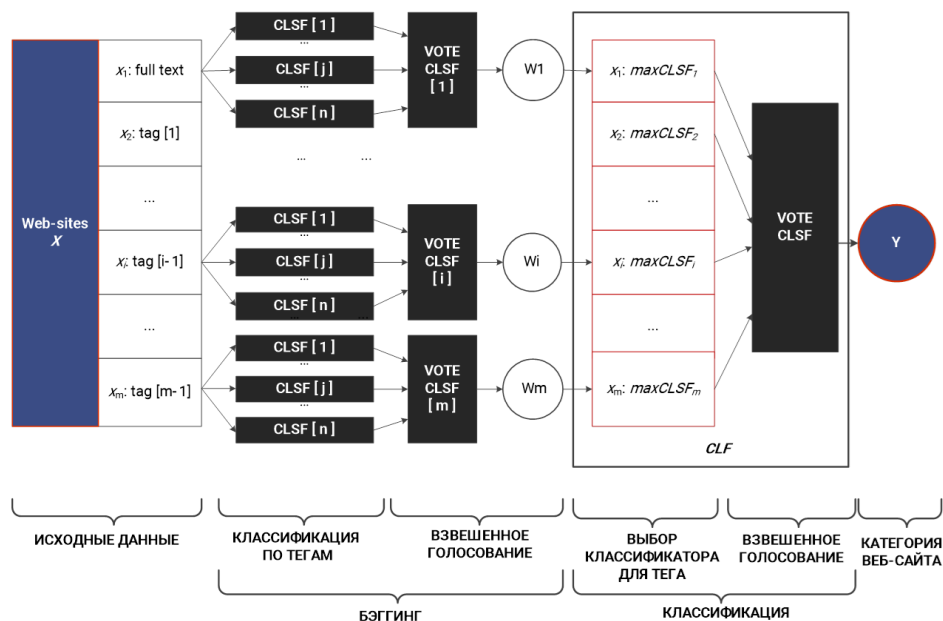


Рис. 6. Схема комплексного алгоритма классификации веб-страницы

В результате проведенного исследования проведен анализ методов машинного обучения в задачах классификации веб-страниц, рассмотрена проблема и изучены основные этапы классификации веб-страниц для выявления нежелательной информации в сети Интернет. Проведена сравнительная характеристика методов машинного обучения. Определены критерии оценки качества методов машинного обучения. Составлен план и проведен эксперимент по оценке алгоритмов классификации веб-страниц с использованием методов машинного обучения. По результатам оценки принято решение разработать комплексный алгоритм классификации веб-страниц для выявления нежелательной информации в сети Интернет.

### Литература

1. Meshkizadeh S., Masoud-Rahmani A. Webpage Classification Based on Compound of Using HTML Features & URL Features and Features of Sibling Pages // Intern. Journal of Advanced Computer Technology. – 2010. – V. 2(4). – P. 36–46.
2. Kotenko I., Chechulin A., Komashinsky D. Evaluation of Text Classification Techniques for Inappropriate Web Content Blocking // Proc. of the IEEE 8th Intern. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. – 2015. – P. 412–417.
3. Qi X., Davison B.D. Web Page Classification: Features and algorithms // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2009. – P. 1–31.
4. Хакимова Э.Р. Анализ подходов к построению интеллектуальных классификаторов текстов, написанных на разных языках // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2018. – Т. 1. – С. 30–33.
5. Patil A.S., Pawar B.V. Automated Classification of Web Sites using Naive Bayesian Algorithm // Proc. of the Intern. Multiconf of Engineers and Computer Scientist. – 2012. – P. 466.

**Гайфулина Диана Альбертовна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N4259

Направление подготовки: 10.04.01 – Информационная безопасность

e-mail: diana-lina95@yandex.ru

**Волошина Наталия Викторовна**

Год рождения: 1976

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., доцент

e-mail: nataliv@yandex.ru

**УДК 004.056****МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТРАФИКА СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ  
В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕТЕВЫХ АНОМАЛИЙ  
Гайфулина Д.А.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Волошина Н.В.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Работа посвящена исследованию сетевого трафика в условиях неопределенных спецификаций сетевых протоколов. Предлагается подход к выявлению типовых структур сетевых протоколов и определения их лексических спецификаций на основе методов структурного анализа «сырых» данных. Актуальность данного научного направления обусловлена высокой гетерогенностью, частичной лексической неопределенностью и использованием новых, проприетарных или модифицированных протоколов передачи информации в компьютерных сетях. Представлены методика анализа сетевого трафика и результаты экспериментов, подтверждающих применимость предлагаемого подхода.

**Ключевые слова:** восстановление форматов данных, структурный анализ, бинарные данные, проприетарные протоколы, анализ защищенности, неопределенные инфраструктуры.

В современном мире информационно-коммуникационные инфраструктуры, как правило, отличаются сложной архитектурой, высокой гетерогенностью и большими объемами обрабатываемых в них данных. К системам с подобной инфраструктурой относятся киберфизические системы (КФС), позволяющие осуществлять интеграцию информационных технологий и устройств взаимодействия с физическими процессами и объектами. Средой передачи данных КФС является совокупность протоколов передачи данных и логических интерфейсов между элементами КФС. Под протоколом рассматриваются алгоритмы, которые определяют последовательность и формат сообщений между сетевыми компонентами. Глобальная информатизация способствует как развитию существующих спецификаций протоколов сетевого обмена, так и появлению новых, в том числе проприетарных протоколов. Таким образом, трафик в существующих сетях передачи информации характеризуется высокой и постоянно растущей гетерогенностью.

В свою очередь, высокая степень взаимодействия элементов программно-аппаратного окружения и пользователей КФС обуславливает важность разработки механизмов защиты от

угроз информационной безопасности, в частности для решения задач обнаружения сетевых аномалий. В данном случае аномалиями являются отклонения от стандартного (эталонного) поведения инфраструктуры или ее отдельных элементов. В условиях использования нерегламентированных протоколов передачи данных (НППД) применение существующих методик обнаружения сетевых аномалий ограничено [1]. Построение модели поведения системы требует идентификации параметров сетевых сообщений, и как следствие, предварительной разметки сетевого трафика. Можно заключить, что выявление аномалий и оценка защищенности КФС в условиях НППД является задачей актуальной и требующей разработки концептуально новых подходов к ее решению. Путем увеличения функциональности систем обнаружения аномалий можно достигнуть повышения качества обнаружения сетевых аномалий в киберфизических системах.

Целью данной работы являлась разработка подхода к выявлению сетевых аномалий в киберфизических системах в условиях НППД. В исследовании ставились следующие задачи:

1. представить подход к выявлению сетевых аномалий в КФС;
2. разработать модель сетевого трафика КФС, содержащего НППД;
3. разработать методику анализа сетевого трафика для определения нерегламентированных протоколов передачи данных;
4. провести оценку точности разработанной методики анализа сетевого трафика.

Системы управления инцидентами безопасности преимущественно имеют трехуровневую архитектуру «агент (сенсор)» – «сервер» – «база (хранилище) данных» [2]. Схема общего подхода к выявлению сетевых аномалий в КФС представлена на рисунке.

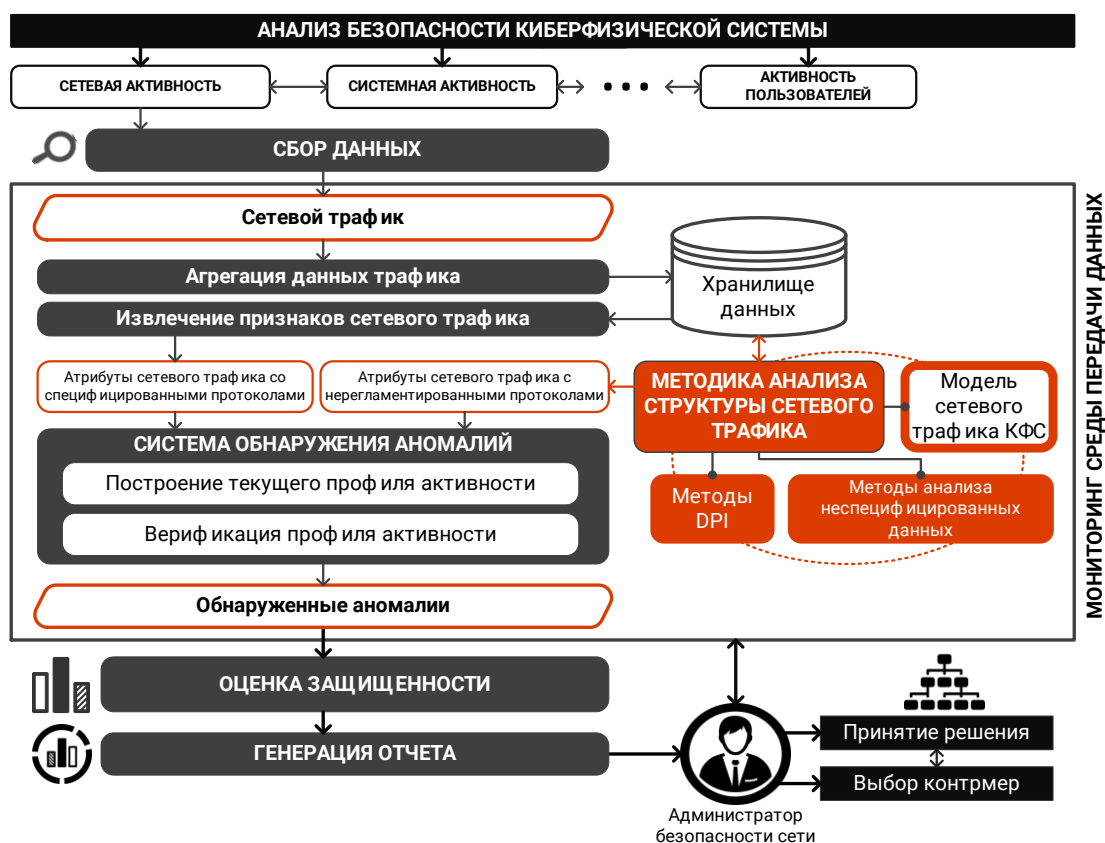


Рисунок. Схема общего подхода обнаружения сетевых аномалий в КФС

Входными данными для решения задачи обнаружения сетевых аномалий в КФС является сетевой трафик, а выходными – решение о наличии или отсутствие аномалии. Для информации, передаваемой с использованием нерегламентированных протоколов, возникает необходимость применения дополнительного инструмента для анализа структуры сетевого трафика. Анализ сетевого трафика, главным образом, основывается на разборе заголовков



протоколов в пакетах. Наиболее сложным и результативным видом анализа трафика является глубокое инспектирование пакетов (Deep Packet Inspection, DPI), реализующее накопление статистических данных о сетевых потоках, а также проверку и фильтрацию сетевых пакетов по полям заголовков протоколов [3]. Отдельным направлением выявления нерегламентированных спецификаций бинарных данных является фаззинг – техника тестирования программ, заключающаяся в анализе выполнения кода (программного или машинного) на специально сформированных либо случайных исходных данных. Данный подход применим и реализован для анализа не только сетевых протоколов [4], но и к любым бинарным данным [5], обрабатываемых исследуемой программой. Однако техника фаззинга реализует анализ бинарных данных методом «серого ящика», когда у исследователя имеется как минимум машинный код, обрабатывающий анализируемую информацию. В свою очередь, предложенный в настоящей работе подход реализует анализ бинарных данных методом «черного ящика», т.е. методика не принимает дополнительных сведений, кроме самих данных трафика. Применяемый в работе подход структурного анализа бинарных данных основан на методах и алгоритмах извлечения ключевых слов из текстов, написанных на естественных языках. Данные методы извлечения ключевых слов учитывают относительные частоты встречаемости языковых единиц и их комбинаций.

Под сетевым трафиком киберфизической системы  $TCS$  (traffic of cyber-physical system) рассматривается информация, передаваемая в виде пакетов данных  $pkt$ , сформированных по алгоритмам нерегламентированных протоколов передачи данных. Структура пакета сетевого трафика КФС  $pkt$  определяется множеством полей структуры пакета. В свою очередь, каждое поле пакета  $field$  описывается идентификатором поля  $if$  и лексическим  $P^{lex}$ , синтаксическим  $P^{syn}$  и семантическим  $P^{sem}$  типом информации

$$field = \langle if, P^{lex}, P^{syn}, P^{sem} \rangle \mid field \in pkt, pkt \in TCS.$$

Множество лексических типов  $P^{lex}$  позволяет определять размер лексем (полей) протоколов. Данное множество основано на размерности машинного слова классической архитектуры Intel8086 для целых значений и включает следующие типы: 8-разрядный ( $BYTE$ ), 16-разрядный ( $WORD$ ), 32-разрядное ( $DWORD$ ), 64-разрядный ( $QWORD$ ), а также массив  $n$ -байт ( $nBYTES$ ).

Множество синтаксических типов  $P^{syn}$  определяет вид значения, которое содержит каждое поле:

1. сигнатурный ( $signature$ );
2. вычисляемый ( $calculated$ ) – значения таких полей коррелируют со значениями одного или более полей, или характеристиками заголовка протокола пакета;
3. логический ( $bool$ ) – поля имеют только два возможных значения;
4. случайный ( $random$ ) – поля с абсолютно уникальными значениями.

Данная работа была направлена исключительно на определение лексической неопределенности. Таким образом, в результате выполнения разработанной методики сетевой трафик становится размеченным по определенным полям протоколов – их лексемам.

Исходными данными предлагаемой методики  $TSD$  (traffic structure determination) являются бинарные данные сетевого трафика  $S$ . Выходными данными являются словарь типовых последовательностей («слов») сетевого трафика  $DW$ , словарь «цепочек слов» для исходных данных сетевого трафика  $DC$  и множество вариантов структуры сетевого трафика  $TCS^T$ . Таким образом, формализованное математическое описание разрабатываемой методики имеет вид:

$$TSD(S) = \{DW, DC, TCS^T\}.$$

Первый этап методики заключается в извлечении типовых последовательностей (ключевых слов, лексем) единиц информации (в данном случае, авторы ограничились байтами данных). Из исходного набора данных  $S$  размерностью  $N$  байт извлекаются всевозможные комбинации байт для формирования множества «слов»  $DW$ . В

сформированном словаре каждое «слово»  $w$  описывается уникальным порядковым идентификатором  $iw$ , значением  $vw$ , длиной  $k$  (в диапазоне от 2 до  $|N|$  байт), и частотой наблюдения  $sw$ :

$$w = \langle iw, vw, k, sw \rangle, w \in DW, k \in [2, N].$$

*Второй этап* методики осуществляет упорядочивание идентификаторов выделенных «слов». При последовательном анализе структурированных бинарных данных может возникнуть ситуация, когда очередной байт информации принадлежит одновременно двум и более возможным словам. В данном случае в упорядоченную последовательность  $LI$  добавляется порядковый идентификатор «слова» с наибольшей частотой наблюдения (как наиболее значимой структурной единицы). Остальные слова в данной позиции последовательности байт исключаются. Участки последовательности бинарных данных, в которых не присутствуют типовые последовательности, соответствуют нулевому идентификатору, обозначающему лексическую неопределенность данного участка.

*Третий этап* методики заключается в определении «цепочек слов» последовательности бинарных данных. Под «цепочкой слов» понимается последовательность полей (лексем) с указанием размера и смещения относительно начала заголовка протокола для каждого из них. Список порядковых идентификаторов  $LI$  аналогично *первому этапу* разбивается на возможные комбинации по следующим условиям: последовательность не должна начинаться с нулевого идентификатора и должна содержать не менее двух слов. Длина (количество включаемых идентификаторов) последовательности увеличивается на единицу до некоторого значения, при котором в исходных данных не будет найдено ни одной идентичной пары последовательностей. Каждая «цепочка слова»  $c$  в формируемом словаре  $DC$  описывается порядковым идентификатором  $ic$ , значением  $vc$ , длиной  $z$ , а также частотой наблюдения  $sc$ :

$$c = \langle ic, vc, z, sc \rangle, c \in DC, z \in [2, |DW|].$$

*Четвертый этап* методики позволяет упорядочить «цепочки слов» на исходных данных аналогично *второму этапу* и избежать их пересечения. В упорядоченную последовательность  $LS$  добавляется порядковый идентификатор «цепочки слов» с наибольшей частотой наблюдения. Участки бинарных данных, в которых не определены типовые структуры, соответствуют нулевому идентификатору. Таким образом, определяется предварительная структура бинарных данных по «цепочкам слов»  $LS$ .

На *пятом этапе* методики производится определение структуры пакетов в бинарных данных. Заголовки пакетов идентифицируются как наиболее часто наблюдаемые «цепочки слов» в последовательности, полученной на *четвертом этапе*. Определяются параметры «слов» для полей пакета  $field'$ , такие как идентификатор  $iw$ , длина  $k$  и частота наблюдения среди сообщений  $ct$ :

$$field' = \langle iw, k, ct \rangle.$$

Далее определяются границы полей в структуре сообщения путем подбора и анализа разметки с использованием словаря лексем. Таким образом, структура каждого пакета  $pkt$  состоит из множества полей  $field$ , принадлежащих выделенной структуре протокола:

$$field = \langle if, P^{lex} \rangle | field \in pkt.$$

При анализе разметки сообщений может возникнуть ситуация, что размер некоторого поля варьируется в нескольких значениях. В таком случае появляются варианты структуры сообщения  $TCS$ , для которых поле с одинаковым смещением от начала заголовка  $x$  имеет разный лексический тип:

$$P_x^{lex} \neq P_y^{lex} | x = y \Rightarrow \begin{cases} P_x^{lex} \in field_x, field_x \in pkt_x, pkt_x \in TCS_x \\ P_y^{lex} \in field_y, field_y \in pkt_y, pkt_y \in TCS_y \end{cases}.$$

Анализируя возможные лексические типы полей сообщений, получается множество вариантов структур бинарных данных сетевого трафика  $TCS^T = \{TCS_1, TCS_2, \dots, TCS_T\}$ . Таким образом, в результате выполнения разработанной методики последовательность бинарных данных становится размеченной по определенным полям протоколов формирования сообщений (лексемам).

Описанная методика анализа сетевого трафика в условиях неопределенных спецификаций сетевых протоколов была реализована на языке программирования Python и апробирована на различных наборах данных. В качестве исходных наборов данных использовались записи сетевого трафика, сформированного на основе семейства стека протоколов TCP/IP: Ethernet, ARP, IPv4, IPv6, TCP, UDP, HTTP, DNS, SSL, NTP, DHCP. Таким образом, пакеты состоят из заголовков указанных протоколов и полезной нагрузки для части из них, например, тела протоколов HTTP и DHCP.

В табл. 1 описываются реальные характеристики анализируемого трафика, характеристики, полученные в результате выполнения разработанной методики. В качестве характеристик фактической структуры записей сетевого трафика используются следующие показатели: длина записи в байтах; число пакетов  $P$ ; количество полей протоколов  $PF$ ; количество уникальных значений полей  $UVF$ ; количество повторяющихся байт  $DD$ . В качестве характеристик записей сетевого трафика, определяемых путем применения разрабатываемой методики, используются следующие: количество найденных «слов»  $W$ ; количество найденных полей протоколов  $DVF$ ; количество найденных «цепочек слов» сетевого трафика  $DPr$ ; количество определенных пакетов  $DP$ ; количество байт полей сетевого трафика  $DFb$ ; количество байт протоколов сетевого трафика  $DPb$ .

Таблица 1. Характеристика структуры записей сетевого трафика

№	Размер, байты	Фактическая структура трафика				Структура нерегламентированных протоколов					
		$PF$ , шт.	$UVF$ , шт.	$P$ , шт.	$DD$ , байт	$W$ , шт.	$DVF$ , шт.	$DPr$ , шт.	$DPb$ , шт.	$DFb$ , байт	$DPb$ , байт
1	1129	23	66	20	869	369	23	13	20	896	705
2	2091	32	43	4	1999	1107	13	69	3	1807	1261
3	2388	25	70	10	2328	780	31	60	10	2105	1533
4	1557	52	109	20	1279	985	35	36	18	1265	866
5	1743	45	101	25	1436	704	55	28	23	1490	1029
6	3898	67	174	51	3093	1021	83	43	49	3093	1995

Для оценки точности вычисляются параметры соотношения между характеристиками фактической структуры сетевого трафика и структурной оценки нерегламентированных протоколов (табл. 2).

Таблица 2. Показатели точности разметки сетевого трафика

№	Размер, байты	Оценка результатов			
		$DVF/UVF$	$P/DP$	$DFb/DD$	$DPb/DD$
1	1129	0,35	1	0,97	0,811
2	2091	0,3	0,75	0,904	0,631
3	2388	0,44	1	0,904	0,659
4	1557	0,32	0,9	0,989	0,685
5	1743	0,54	0,92	0,964	0,717
6	3898	0,47	0,96	1	0,645
Среднее значение		0,4	0,92	0,95	0,69

Можно выделить, что методика позволяет достигнуть более высокой эффективности определения слов, совпадающих с реальными полями сетевых протоколов ( $DVF$ ) при

больших количествах наблюдаемых протоколов в стеке и их значений (дампы 5-6). Наличие большего объема данных полей протоколов в трафике (*UFV, DD*) позволяет получить более высокую оценку точности разметки сетевого трафика по пакетам (*DP*) и полям протоколов (*DPb*). Оценка точности разметки трафика по протоколам (*DPb*), в свою очередь, демонстрирует более высокой эффективность методики при наличии большего числа пакетов (*P*) в совокупности с относительно небольшим количеством используемых сетевых протоколов (*PF*) в трафике (дамп 1). Это обосновывается достаточным наличием дублируемых данных сетевого трафика, необходимым для анализа его структуры.

В результате проведенных исследований разработана методика анализа бинарных данных в условиях неопределенных спецификаций сетевых протоколов, направленная на преодоление лексической неопределенности сетевого трафика. По результатам экспериментальной оценки точности разработанной методики, выявленные типовые последовательности по средним показателям на 95% соответствуют содержанию полей сетевых протоколов трафика, а выявленные структуры на 70% соответствуют спецификациям данных протоколов. Низкие показатели оценки точности определения протоколов сетевого трафика в ряде случаев являются следствием недостаточного количества дублируемых данных сетевого трафика, необходимым для анализа его структуры.

Практическая значимость работы заключалась в возможности выполнения предварительной обработки данных сетевого трафика с целью определения его атрибутов для автоматизированного решения задач обнаружения аномалий, выполнения аудита безопасности (выявления уязвимостей протоколов), а также расследования инцидентов информационной безопасности в условиях неопределенных спецификаций сетевых протоколов.

В дальнейших исследованиях по данному направлению планируется увеличить точность методики разметки сетевого трафика, а также адаптировать ее к параллельной обработке больших исходных данных для возможности применения подхода в реальном времени и анализа неопределенных спецификаций сетевых протоколов «на лету».

## Литература

1. Гайфулина Д.А. Аналитический обзор методов обнаружения аномалий сетевого уровня киберфизических систем // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2018. – Т. 1. – С. 4–5.
2. Котенко И.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Ушаков И.А., Красов А.В. Комплексный подход к обеспечению безопасности киберфизических систем на основе микроконтроллеров // Вопросы кибербезопасности. – 2018. – № 3(27). – С. 29–38.
3. Bremler-Barr A., Harchol Y., Hay D., Koral Y. Deep Packet Inspection as a Service // Proceedings of the 10th ACM International on Conference on emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT'14). – 2014 – P. 271–282.
4. Amini P., Greene A., Sutton M. Fuzzing: Brute Force Vulnerability Discovery // Addison-Wesley Professional. – 2007. – P. 513.
5. Zalewski M. American Fuzzy Lop [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lcamtuf.coredump.cx/afl/> (дата обращения: 27.09.2018).

**Калинкина Мария Евгеньевна**

Год рождения: 1991

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, аспирант

Направление подготовки: 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника

e-mail: maria\_kalinkina@mail.ru

**Козлов Алексей Сергеевич**

Год рождения: 1984

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, аспирант

Направление подготовки: 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника

e-mail: zz.kozlov@gmail.com

**Лабковская Римма Яновна**

Год рождения: 1988

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., доцент

e-mail: labkovskaya@mail.ifmo.ru

**Мамин Артём Рашидович**

Год рождения: 1998

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N3360

Направление подготовки: 11.03.03 – Конструирование и технология электронных средств

e-mail: davzverg@gmail.com

**Пирожникова Ольга Игоревна**

Год рождения: 1989

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., ассистент

e-mail: cheezecake@mail.ru

**Ткалич Вера Леонидовна**

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, д.т.н., профессор

e-mail: vera\_leonidovna\_tkalich@mail.ru

УДК 621.395.617

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ОТЕЧЕСТВЕННОЙ МИКРОФОННОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ПРОВЕДЕННЫХ  
ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Калинкина М.Е., Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Мамин А.Р., Пирожникова О.И.,  
Ткалич В.Л.**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Ткалич В.Л.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Предметом исследования являлся микрофон – электроакустическое устройство, которое преобразует акустические колебания в электрический сигнал, так что давление акустических колебаний воздуха, воды или твердого вещества воздействует на тонкую мембрану микрофона, вибрации которого возбуждают электрические колебания. Объект исследования относится к электродинамическим преобразователям для приема аудиосигналов и может быть использован в устройствах звуковой и телефонной связи в движущихся объектах для преобразования акустических сигналов в электрические сигналы. Чаще всего используемые микрофоны представляют собой чувствительные элементы электретного типа, поскольку они обладают лучшими электроакустическими свойствами: широкий диапазон частот; небольшая неравномерность амплитудно-частотной характеристики; малый уровень искажений из-за нелинейных и переходных процессов, а также высокая чувствительность и низкий собственный шум.

**Ключевые слова:** микрофоны, МЭМС, патентный поиск.

Для сравнительной оценки качества вышеперечисленных микрофонов используются технические характеристики, наиболее важными из которых являются характеристика направленности и индекс направленности. Характеристику, или диаграмму направленности определяют или на ряде частот, или в пределах полосы частот. Обычно используется нормализованная характеристика направленности  $R(q)$ , т.е. зависимость отношения чувствительности  $E_q$ , измеренной под углом  $q$ , к осевой (максимальной) чувствительности  $E_{oc}$ :

$$R(q) = E_q/E_{oc}. \quad (1)$$

Конденсаторные и электретные конденсаторные микрофоны сыграли важную роль в развитии технологии микрофонов.

С начала 1980-х годов были сделаны первые разработки в области технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС), и технология МЭМС-микрофонов начала развиваться. МЭМС-микрофоны конструктивно и функционально аналогичны акселерометрам или датчикам давления. Однако многие современные устройства используют емкостный принцип, известный для МЭМС-датчиков объемного ускорения, но в недифференциальном варианте. Микрофоны выполнены на силиконовой подложке (основание и подвижная пластина). Источником воздействия, однако, являются звуковые колебания. Поэтому МЭМС-структуры кремниевых микрофонов чувствительны к механическому движению и звуковому давлению. Микрофоны МЭМС могут быть меньше, чем большинство компактных микрофонов, и менее подвержены вибрациям, колебаниям температуры и электромагнитным помехам. Это важно в мобильных телефонах и других аудиоустройствах с аудиовходом, таких как ноутбуки, видеомикрофоны, цифровые камеры, наушники и электронные стетоскопы. Поэтому перспектива снижения цен на MEMS выше, поскольку они включают в себя не только стоимость производства самого компонента, но также высокую производительность, надежность и затраты на сборку.

Существуют угольные микрофоны, основанные на свойстве угольного порошка изменять электрическое сопротивление в зависимости от силы сжатия между углеродными

зернами. Преимуществами угольных микрофонов являются высокая чувствительность и простота конструкции, недостатками являются высокий собственный шум, значительная частота и нелинейные искажения. Также к недостаткам угольных микрофонов можно отнести необходимость использования микрофона с пониженной мощностью для снижения их шумовых и частотных характеристик [1].

Известны электродинамические и электромагнитные микрофоны, в основе работы которых индукционный ток в замкнутом проводнике действует, когда он движется в магнитном поле или когда поле изменяется. Преимуществами этих микрофонов являются нечувствительность к ветру и ударам, а недостатки: низкое качество звука и низкая чувствительность, которые требуют использования трансформатора или усилителя микрофона. Трансформатор генерирует частоту и нелинейные искажения, подвержен влиянию электромагнитных помех и является источником помех, вызывающих потерю информации и создающих помехи другим электронным устройствам [1].

В этот же тип входят ленточные микрофоны, недостатками которых являются высокая чувствительность к порывам ветра, которая может вызвать разрыв ленты, а также подверженность резким перепадам давления и электромагнитным помехам [1].

Известны конденсаторные и электретные конденсаторные микрофоны, имеющие наилучшие электроакустические параметры. Недостатками конденсаторных микрофонов являются необходимость использования подходящего микрофонного усилителя и каскада, а также высокая стоимость, недостатки электретных конденсаторных микрофонов: чувствительность к механическим воздействиям, ограниченный диапазон условий эксплуатации (температура воздуха, относительная влажность) и необходимость в усилителях звука [1].

Существуют пьезоэлектрические микрофоны, принцип действия которых основан на явлении пьезоэлектрического эффекта. Микрофон состоит из мембраны, которая передает колебания через стержень на пьезоэлектрическую пластину, что приводит к деформации пьезоэлектрической пластины и натяжению ее пластин. Недостатками пьезоэлектрических микрофонов являются относительно низкая чувствительность, низкая механическая стойкость, гигроскопичность и значительная чувствительность к изменениям температуры окружающей среды. Кроме того, пьезоэлектрические микрофоны используются только с усилителем звука, подверженным электромагнитным помехам [1].

Области применения микрофонов по результатам патентных исследований:

- как рядовой способ звукозаписи или передачи звука на акустический излучатель [2];
- в устройствах громкоговорящей и телефонной связи на подвижных объектах для преобразования акустических сигналов в электрические [3];
- в радиовещании, телевидении, телефонии и других отраслях связи [4];
- в конструкции микроминиатюрных приемников акустических сигналов специального назначения [5];
- в технических системах приема и обработки акустической информации [6];
- как акустический приемник направленного действия, применяемый для регистрации звуковых сигналов, в условиях окружающего шума [7];
- в репортерских целях или для специальных записей звука в присутствии внешних шумов [8];
- как вариант компактного микрофона с простым принципом действия, которому требуется усилитель и источник высокого напряжения [9];
- в местах повышенного воздействия электрических или магнитных полей. А также в условиях повышенной температуры или высокой влажности [10];
- для измерения звукового давления в авиационной технике, машиностроении, в любых областях народного хозяйства [11].

При эксплуатации микрофонов возникает ряд проблем, таких как:

- повышение чувствительности;
- упрощение конструкции;
- расширение интервала рабочих температур и давлений;
- повышение помехозащищенности;
- улучшение диаграммы приема;
- повышения надежности приема;
- снижение потребления тока;
- расширение области применения;
- снижение себестоимости.

Возможные пути их устранения по результатам патентных исследований:

- повышения чувствительности [2–5];
- повышение помехозащищенности [6–8];
- упрощения конструкции [9–11].

**Заключение.** В сфере звукозаписи крайне важны такие показатели, как помехозащищенность, простота конструкции и чувствительность звукозаписывающей техники. Представленные способы устранения той или иной проблемы указывают на то, что до сих пор нельзя изобрести близкое к идеальному звукозаписывающее устройство с широким диапазоном записываемых частот, которое будет иметь относительно простую конструкцию и с достаточной защищенностью от помех и шумов. В каждом из патентов были изложены оригинальные мысли насчет возможного решения какой-то одной проблемы.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что технологические достижения, поддерживаемые рынком массового потребления, вскоре вызовут интерес к этим устройствам со стороны компаний, которые производят специализированное оборудование: военное, аэрокосмическое, как это уже имеет место в медицинском и промышленном секторах, IT и телекоммуникации. Микрофоны могут быть встроены в кабины или пилотные шлемы и реализовывать речевые интерфейсы «человек-человек» или «человек-машина» или «слышать» работу машин и устройств.

### Литература

1. Пестриков В.М. Практическое применение современных электронных схем и радиодеталей. – СПб.: Впечатление КОРОНА, 2000. – 592 с.
2. Патент RU 2290772 (С2), МПК7 Н04R 9/08 Н04R 11/04. Микрофон электродинамический // Зубарев Николай Владимирович (RU), Фадин Игорь Михайлович (RU); заявитель и правообладатель Зубарев Николай Владимирович (RU), Фадин Игорь Михайлович (RU) – No. 2005107081/28; заявл. 02.03.2005; опубл. 10.08.2006 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 36.
3. Патент RU 2473181 (С1), МПК7 Н04R 23/00. Оптический микрофон // Катанович Андрей Андреевич (RU), Бондарь Михаил Владимирович (RU), Ершов Валерий Николаевич (RU) и др.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение 24 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации (RU) – No. 2011119836/28; заявл. 17.05.2011; опубл. 20.01.2013 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 2.
4. Патент RU 2590219 (С1), МПК7 Н04R 19/04. Способ увеличения чувствительности конденсаторных микрофонов // Горбунов Михаил Алексеевич (RU), Крутяков Ювеналий Александрович (RU), Свобода Дмитрий Георгиевич (RU); заявитель и патентообладатель Крутяков Ювеналий Александрович (RU), Свобода Дмитрий Георгиевич (RU) – No. 2015117661/28; заявл. 12.05.2015; опубл. 10.07.2016 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 19.
5. Патент RU 2365064 (С1), МПК7 Н04R 23/00 Н04R 7/00. Оптический микрофон и способ изготовления его звукочувствительной мембраны // Ветров Андрей Анатольевич (RU), Ильков Владимир Константинович (RU), Комиссаров Станислав Сергеевич (RU) и др.;



- заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им В.И. Ульянова (Ленина) (RU), Войсковая часть 35533 (В/ч 35533) (RU) – No. 2008115400/28; заявл. 18.04.2008; опубл. 20.09.2009 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 23.
6. Патент RU 2375842 (C1), МПК7 H04R 23/00. Оптико-электронный микрофон // Молчалин Виктор Дмитриевич (RU); заявитель и патентообладатель Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России) (RU) – No. 2008126979/28; заявл. 02.07.2008; опубл. 10.12.2008 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 34.
  7. Патент RU 2388175 (C2), МПК7 H04R 1/34. Направленный микрофон HELIX // Касоев Сергей Георгиевич (RU); заявитель и патентообладатель Касоев Сергей Георгиевич (RU) – No. 2007146840/28; заявл. 19.12.2007; опубл. 27.06.2009 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 12.
  8. Патент RU 2411692 (C2), МПК7 H04R 1/34. Микрофонное устройство с остронаправленной приемной диаграммой // Венедиктов Михаил Дмитриевич (RU), Блок Александр Александрович (RU), Крутяков Ювеналий Александрович (RU), Шихатов Анатолий Иванович (RU); заявитель и патентообладатель Крутяков Ювеналий Александрович (RU) – No. 2009101666/28; заявл. 21.01.2009; опубл. 10.02.2011 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 4.
  9. Патент RU 2310294 (C2), МПК7 H04R 19/04. Система электретного конденсаторного микрофона // Петров Андрей Юрьевич (RU), Сенченко Валентин Михайлович (RU); заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «АРГУС-СПЕКТР» (ЗАО «Аргус-Спектр») (RU) – No. 2005137560/28; заявл. 29.11.2005; опубл. 10.06.2007 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 31.
  10. Патент RU 2273115 (C2), МПК7 H04R 23/00. Оптический микрофон // Толстунов Сергей Андреевич (RU), Мозер Сергей Петрович (RU); заявитель и патентообладатель государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет) (RU) – No. 2004134499/28; заявл. 25.11.2004; опубл. 27.03.2006 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 9.
  11. Патент RU 2327962 (C1), МПК7 G01L 9/12. Измерительный конденсаторный микрофон звукового давления и способ его сборки // Казарян Акоп Айрапетович (RU), Езеев Николай Алексеевич (RU), Шестопапов Александр Никифорович (RU); заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФГУП «ЦАГИ») (RU) – No. 2007106953/28; заявл. 27.02.2007; опубл. 27.06.2008 – 2 с. – 0,04 п.л.: ил. Бюл. № 18.



**Калинкина Мария Евгеньевна**

Год рождения: 1991

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, аспирант

Направление подготовки: 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника

e-mail: mariia\_kalinkina@mail.ru



**Козлов Алексей Сергеевич**

Год рождения: 1984

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, аспирант

Направление подготовки: 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника

e-mail: zz.kozlov@gmail.com



**Лабковская Римма Яновна**

Год рождения: 1988

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., доцент

e-mail: labkovskaya@mail.ifmo.ru



**Пирожникова Ольга Игоревна**

Год рождения: 1989

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., ассистент

e-mail: cheezecake@mail.ru



**Ткалич Вера Леонидовна**

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, д.т.н., профессор

e-mail: vera\_leonidovna\_tkalich@mail.ru

**УДК 531.768**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРА ЗА СЧЕТ  
БАЛАНСИРОВКИ И КОРРЕКТИРОВКИ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ  
ПЛАТФОРМЫ ПРИ ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ**

**Калинкина М.Е., Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л.**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Ткалич В.Л.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

В работе рассмотрено краткое описание конструкции, работы и возможностей инерциальной навигационной системы. Рассмотрены основные проблемы достижения качественных показателей системы. Подводя итог, можно сказать, что изученные материалы являются фундаментальными.

**Ключевые слова:** микрофоны, МЭМС, патентный поиск.

Гироскопическое устройство для пространственной стабилизации любых объектов или приборов, а также для определения углов поворота основания, на котором оно установлено, служит для стабилизации приборов и для устранения влияния внешних факторов, из которых платформа выходит из заданного положения [1].

Датчики ускорения – это тот тип датчика, который характеризуется ценой, качеством и чувствительностью измерений. Область применения этих датчиков широка: от бытовых приборов до медицинских приборов и защитного оборудования. Были изобретены первые простые аналоговые датчики ускорения, но теперь миниатюрные датчики реализованы с дискретным выходом, который подключается в реальном времени к управляемому компьютеру, регистрируется и может контролироваться. Эти датчики оснащены соответствующим программным обеспечением, которое позволяет не только настраивать датчики ускорения, но и имеет несколько цифровых ошибок, возникающих во время преобразования и передачи данных, включая ошибки выборки и корректирующий шум [2].

Гиростабилизированные платформы (ГСП) нашли широкое применение на мобильных объектах различного типа. Это ракеты-носители, спутники, тактические палубные самолеты, стратегические бомбардировочные самолеты, надводные корабли и подводные лодки, боевые машины, палубная артиллерия и многие другие, включая оборонное оборудование. Основной задачей, решаемой ГСП, является построение на объекте в общем случае триортогональной системы координат данного канала требуемой точности. Особенно важны эти свойства для установленных в них оптоэлектронных устройств, гироскопов, приборов ночного видения, инфракрасных прицельных оптических головок, и многих других. В то же время в работах многих авторов [1–3] очевидно, что стабилизированная трехосная платформа по-прежнему подвержена внешним, гармоническим или случайным нарушениям, которые переносят по трем осям свои собственные остатки, что в основном связано с наличием перекрестных соединений между каналами стабилизации.

Одним из современных направлений проектирования ГСП является использование высокочувствительных оптоэлектронных устройств, которые выполняют задачи в течение дня. Из-за недостаточной точности, низкой скорости управления, недостаточной помехоустойчивости и надежности, они не могут использоваться в современных мобильных навигационных системах.

В сенсорных элементах, управляемых ГСП, которые находятся на движущихся объектах, действуют внешние механические возмущения по трем осям, вызванные динамикой движущихся объектов, вибрациями приводных механизмов несущей, воздействием ветра, дисбалансом движущихся частей.

Задача управления решается путем создания теории систем ориентации и стабилизации.

По мере развития технологий датчики все чаще используются для обеспечения большей части обратной связи на инструментах, машинах и роботах. В частности, ускорение измеряется датчиками ускорения.

Акселерометры – датчики линейных ускорений, предназначенные для измерения ускорения движущегося объекта и преобразования ускорения в электрический сигнал. Сигналы, пропорциональные ускорению, используют для стабилизации и автоматического управления движущимся объектом на траектории. Акселерометры измеряют кажущееся ускорение, являющееся разностью между абсолютным линейным ускорением объекта и ускорением силы тяготения Земли.

На современных самолетах, ракетах, спутниках и космических кораблях акселерометры применяются в автопилотах для улучшения характеристик устойчивости и управляемости объекта, а в системах инерциальной навигации – в качестве основных датчиков, предназначенных для измерения ускорения, с которым перемещается центр масс объекта. Акселерометры используются также в качестве индикаторов плоскости горизонтирования гиросtabilизированных платформ и иных устройств.

Датчики ускорения являются частью инерциальных навигационных систем, где полученные измерения с их помощью интегрируются для получения инерциальной скорости и координат пользователя, когда регистрируются амплитуды выше самой резонансной частоты.

Электронные датчики ускорения часто используются в мобильных устройствах (телефонах), которые интегрированы и используются в качестве шагомера, датчиков для определения положения в пространстве, автоматического поворота экрана и других целей.

Рассмотрим установку акселерометра на гиросtabilизированной платформе. Эта платформа использует характеристики гироскопа для поддержания выравнивания своей оси в пространстве без изменений, обеспечивает строго горизонтальное положение оси датчика ускорения (с точностью до единиц угловых секунд). Измеренные ускорения интегрируются дважды, и, таким образом, получается информация об изменении положения движущегося объекта. В сочетании с общим объектом для определения координат движущегося объекта гироскопы и акселерометры образуют инерциальную навигационную систему (ИНС). В дополнение к этой задаче акселерометр предоставляет информацию ИНС об угловой ориентации угла крена, тангажа, рыскания (курса) и скорости объекта.

В основе конструкции акселерометра – грузик (инертная масса), который перемещается внутри корпуса на пружине (или другом упругом элементе), которая реагирует на силы инерции, возникающие при ускорении или замедлении объекта. Чем больше ускорение, тем больше отклоняется грузик. Когда сила инерции груза сбалансирована с силой пружины, величина его смещения от нейтрального положения указывает величину ускорения (замедления), регистрируется датчиком перемещения и преобразуется в электрический сигнал на выходе прибора. Затем этот сигнал отправляется на электронный блок или на бортовой компьютер для обработки [4].

Акселерометр сконструирован таким образом, что он реагирует только на ускоряющую составляющую, совпадающую с направлением движения груза, так называемой осью чувствительности устройства. У простых датчиков ускорения есть такая ось, но есть варианты с двумя или тремя осями чувствительности. Акселерометр характеризуется реакцией на принцип его действия не только с точки зрения инерции, но и с точки зрения силы тяжести. В некоторых случаях это мешает, в других – помогает.

При использовании в движущихся объектах датчики ускорения подвергаются воздействию климатических и механических воздействий. Атмосфера Земли имеет широкий диапазон изменений состояния в зависимости от местоположения, станции и высоты над уровнем моря, от температуры, давления, влажности, ионизации и других параметров. Для большинства устройств (особенно акселерометров) диапазон температур, в котором устройства должны находиться в нормальном режиме работы, находится в диапазоне от минус 40°C до плюс 60°C. В некоторых случаях температура окружающего воздуха устройство во время работы должно быть значительно больше +60°C и достигать значения +80°C. Современные устройства должны гарантировать нормальную работу при относительной влажности до 98%, а содержание пыли в воздухе в соответствии с общими техническими условиями.

## Литература

1. Анциферов С.А., Могилевич Л.И. Гидродинамические силы, действующие на поплавков маятникового акселерометра при несимметричном истечении жидкости // Авиакосмическое приборостроение. – 2003. – № 11. – С. 19–26.

2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 399 с.
3. Кашкаров А.П. Микроэлектромеханические системы и элементы. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 114 с.
4. Ачильдиев В.М., Грузевич Ю.К., Солдатенков В.А. Информационные измерительные и оптико-электронные системы на основе микро- и наномеханических датчиков угловой скорости и линейного ускорения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 264 с.



**Кляус Татьяна Константиновна**

Год рождения: 1993

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, аспирант

Направление подготовки: 10.06.01 – Информационная безопасность

e-mail: t\_klyaus@corp.ifmo.ru



**Гатчин Юрий Арменакович**

Год рождения: 1952

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, д.т.н., профессор

e-mail: gatchin@mail.ifmo.ru

УДК 004.056

**ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ  
ИНФОРМАЦИИ**

**Кляус Т.К.**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Гатчин Ю.А.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

В работе проведен обзор существующих экономических метрик информационной безопасности, рассмотрены способы получения значений параметров для каждой из рассмотренных метрик, выполнена оценка экономической эффективности системы защиты информации машиностроительного предприятия. Рассчитано значение показателя рентабельности инвестиций в информационную безопасность ROI (Return on Investment) для средств защиты информации, блокирующих различные виды атак.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, защита информации, информационная система, оптимизация, оценка эффективности, обобщенный критерий эффективности.

Согласно отраслевому обзору компании Radware, посвященному роли информационной безопасности (ИБ) в устойчивом развитии бизнеса, 93% из 790 респондентов, представляющих различные организации по всему миру, отметили, то их информационные системы (ИС) подвергались атакам в 2018–2019 гг. [1]. Высокая вероятность реализации атак на ИС и возникновение иных инцидентов ИБ обуславливает необходимость систем защиты информации (СЗИ). Под СЗИ будем понимать совокупность программных и технических средств, предназначенную для обеспечения защищенности обрабатываемой в ИС информации от утечки, уничтожения, копирования, модификации и блокирования доступа к ней.

В случае если обрабатываемая в ИС информация относится к определенной категории сведений (персональные данные; информация, обрабатываемая в государственных ИС или в ИС объектов критической инфраструктуры), то требования к ее защите регламентируются нормативно-правовыми и методическими документами федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации: Постановлением Правительства РФ от 01.11.2012 № 1119 «Об утверждении Требований к защите персональных данных при их

обработке в информационных системах персональных данных», Приказом ФСТЭК от 18.02.2013 № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных», Методическим документом ФСТЭК «Меры защиты информации в государственных информационных системах», Приказом ФСТЭК от 25.12.2017 № 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры» и т.д.

Если информация, обрабатываемая в ИС, представляет собой коммерческую тайну, «обладатель информации вправе применять при необходимости средства и методы технической защиты конфиденциальности этой информации, другие, не противоречащие законодательству РФ меры» [2]. В данном случае целесообразно руководствоваться серией международных стандартов ISO/IEC 27000. Стандарты системы менеджмента информационной безопасности (СМИБ) направлены на применение риск-ориентированного подхода к управлению информационной безопасностью. Риск-ориентированный подход является производной принципа экономической целесообразности, примененного к сфере защиты информации [3]. В основе данного подхода лежит положение о необходимости соблюдения баланса между затратами на СЗИ и экономическим эффектом, заключающемся в снижении величины ущерба от инцидентов ИБ.

Проведенный анализ существующих работ, посвященных вопросам оптимизации состава и оценки эффективности СЗИ, подтвердил, что при оценке эффективности данных систем должны оцениваться как техническая, так и экономическая ее составляющие. Как правило, задачи оценки эффективности СЗИ сводятся к задачам линейного программирования [4–7]. При формировании целевых функций авторы указанных работ задают ограничения на эффективность и стоимость средств защиты информации.

Техническая эффективность СЗИ оценивается с точки зрения способности ее противодействия атакам на ИС. Для оценки экономической эффективности СЗИ используются экономические метрики ИБ. В работе Bohme R., Moore T. [8], посвященной разработке модели инвестиций в ИБ, рассматриваются следующие категории метрик:

- метрики, оценивающие выгоды (прибыль) от внедрения мер защиты информации;
- высокоуровневые инвестиционные метрики.

К первой группе метрик авторы [8] относят:

1. годовые ожидаемые потери *ALE* (Annual loss Expectancy). Годовые ожидаемые потери *ALE* представляют собой финансовые потери от инцидентов ИБ в течение года:

$$ALE = SLE \cdot ARO,$$

где *SLE* (Single Loss Exposure) – потенциальный ущерб от реализации единичной угрозы; *ARO* (Annual Rate of Occurrence) – ожидаемое ежегодное количество атак;

2. ожидаемые выгоды от инвестиций в обеспечение ИБ *EBIS* (Expected Benefit of Information Security). Ожидаемые выгоды от инвестиций в обеспечение ИБ представляют собой разность между годовыми ожидаемыми потерями при отсутствии мер безопасности (*ALE<sub>0</sub>*) и годовыми ожидаемыми потерями при использовании защитных мер (*ALE<sub>s</sub>*):

$$EBIS_s = ALE_0 - ALE_s;$$

3. ожидаемые чистые выгоды от инвестиций в обеспечение ИБ *ENBIS* (Expected Net Benefit of Information Security). Ожидаемые чистые выгоды от инвестиций в обеспечение ИБ представляют собой разность между ожидаемыми выгодами от инвестиций в обеспечение ИБ и затратами на организации на приобретение и эксплуатацию средств защиты информации *CSI* (Cost of Security Investment). Рассчитываются по формуле:

$$ENBIS_s = EBIS_s - CSI.$$

Ко второй группе метрик авторы относят:

1. рентабельность инвестиций в информационную безопасность *ROI* (*ROSI*) (Return on Investment/Return on Security Investment). Рентабельность инвестиций в ИБ *ROI*

представляет собой отношение ожидаемой чистой прибыли от инвестиций в ИБ *ENBIS* к затратам на приобретение и эксплуатацию средств защиты информации *CSI*:

$$ROI = \frac{ENBIS_s}{CSI}$$

В работе [9] предложен следующий способ расчета показателя *ROI*:

$$ROI = \frac{[ALE \cdot RM - CSI]}{CSI},$$

где *RM* – показатель эффективности контрмеры;

2. чистая приведенная стоимость *NPV* (Net Present Value). Показатель чистой приведенной стоимости представляет собой ожидаемые чистые выгоды от инвестиций в ИБ в течение нескольких будущих периодов, сумма которых приведена к начальному моменту времени.

Рассчитывается по формуле:

$$NPV_s = -CSI_0 + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{ALE_{0,t} - ALE_{s,t} - CSI_t}{(1+r)^t},$$

где *CSI*<sub>0</sub> – разовые затраты на обеспечение ИБ при *t=0*; *CSI*<sub>*t*</sub> – затраты на обеспечение ИБ за период *t*; *ALE*<sub>*s,t*</sub> – ожидаемые потери за период *t* при заданном уровне безопасности *s*; *r* – ставка дисконтирования.

Значения параметров, используемых при расчете приведенных выше экономических метрик, предлагается получить следующим образом: значение параметра *ARO* – на основании анализа данных межсетевых экранов и средств предотвращения вторжений; значение параметра *SLE* – методом экспертных оценок; значения параметра *CSI* – путем суммирования затрат на приобретение программных и технических средств защиты информации, а также лицензий; значение показателя *RM* – на основании оценок эффективности средств защиты информации, проводимых специализированными лабораториями [10]. Для определения значения ставки дисконтирования используются специализированные методы (кумулятивный и укрупненный).

В качестве примера рассмотрена СЗИ ИС машиностроительного предприятия. Число персональных компьютеров в сети составляет 400 ед., стоимость основных фондов предприятия – 450 млн руб. Состав и стоимость СЗИ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав и стоимость СЗИ

№ п/п	Наименование аппаратных и программных средств, составляющих СЗИ	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.	Непредусмотренные расходы (3%), руб.	Итого, руб.
1	Система предотвращения вторжений (400 ПК)	1	770 000,00	770 000,00	23 100,00	793 100,00
2	Антивирус Endpoint Security (Лицензия на 400 узлов)	1	600 000,00	600 000,00	18 000,00	618 000,00
Итого:				1 370 000,00	41 100,00	1 411 100,00

Рассчитаем значение параметра *ROI* для антивируса и системы предотвращения вторжений по формуле, предложенной в работе [9]:

$$ROI = \frac{AV \cdot ARO \cdot EF - CSI}{CSI},$$



где  $AV$  – стоимость основных фондов предприятия;  $ARO$  – ожидаемое ежегодное количество атак;  $EF$  – коэффициент риска потерь, выраженный в долях от реализации угрозы (атаки).

Используя данные каталога общих шаблонов атак CAPEC (Common Attack Pattern Enumeration and Classification) и методику определения вероятностей реализации атак, предложенную в работе [11], определим возможные атаки на ИС и вероятности их реализации. Коэффициент риска потерь, выраженный в долях от реализации угрозы  $EF$ , примем равным вероятности реализации атаки на ИС. Предположим, что каждой атаке противодействует либо антивирусная программа, либо система предотвращения вторжений. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет значений показателя рентабельности инвестиций в информационную безопасность ROI

№ п/п	Наименование атаки по каталогу шаблонов атак CAPEC	Вероятность реализации атаки	Мера защиты от атаки	Коэф. риска потерь от реализации атаки EF	Ожидаемое ежегодное количество атак ARO	Стоимость средств защиты информации и CSI	Рентабельность инвестиций в обеспечение ИБ ROI
1	CAPEC 21	0,071	СПВ	0,071	1	793 100,00	39,53
2	CAPEC 22	0,107	СПВ	0,107	1	793 100,00	59,79
3	CAPEC 112	0,071	СПВ	0,071	1	793 100,00	39,53
4	CAPEC 114	0,107	Антивирус	0,107	1	618 000,00	77,02
5	CAPEC 123	0,107	Антивирус	0,107	1	618 000,00	77,02
6	CAPEC 125	0,036	СПВ	0,036	1	793 100,00	19,26
7	CAPEC 148	0,071	Антивирус	0,071	1	618 000,00	51,01
8	CAPEC 151	0,071	Антивирус	0,071	1	618 000,00	51,01
9	CAPEC 165	0,036	СПВ	0,036	1	793 100,00	19,26
10	CAPEC 440	0,036	Антивирус	0,036	1	618 000,00	25,01
11	CAPEC 441	0,179	Антивирус	0,179	1	618 000,00	129,03
12	CAPEC 117	0,071	СПВ	0,071	1	793 100,00	39,53
13	CAPEC 169	0,036	СПВ	0,036	1	793 100,00	19,26

Полученные результаты следует интерпретировать следующим образом: все применяемые средства защиты являются экономически эффективными при минимальном ожидаемом количестве атак  $ARO$ . В случае если атаки отсутствуют вообще, показатель рентабельности инвестиций в ИБ принимает отрицательное значение.

В настоящей работе рассмотрены экономические метрики ИБ, применяемые для оценки экономической эффективности СЗИ. Приведен пример расчета значений показателя рентабельности инвестиций ROI для СЗИ ИС машиностроительного предприятия. Основной трудностью при расчетах подобного типа является необходимость экспертной оценки ряда параметров (вероятности реализации атак на ИС и т.д.), однако, при наличии статистических данных и корректной их интерпретации, погрешность результата сводится к минимуму.

## Литература

1. The Trust Factor. Cybersecurity's Role in Sustaining Business Momentum. 2018–2019 Global Application & Network Security Report. Radware: Cloud Security Products and Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.radware.com/ert-report-2018/>, своб.
2. Федеральный закон от 29.07.2004 № 98-ФЗ «О коммерческой тайне». КонсультантПлюс – правовые ресурсы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_48699/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_48699/), своб.

3. Верификационный и риск-ориентированный подходы к обеспечению и управлению информационной безопасностью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://studref.com/431881/informatika/verifikatsionnyu\\_risk\\_orientirovannyyu\\_podhody\\_obespecheniyu\\_upravleniyu\\_informatsionnoy\\_bezopasnostyu](https://studref.com/431881/informatika/verifikatsionnyu_risk_orientirovannyyu_podhody_obespecheniyu_upravleniyu_informatsionnoy_bezopasnostyu), своб.
4. Маслова Н.А. Методы оценки эффективности систем защиты информационных систем // Штучный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 253–264.
5. Хализев В.Н., Кузьмин Д.И. Методика выбора оптимального набора средств программно-аппаратных средств защиты // Физико-математические науки и информационные технологии: проблемы и тенденции развития: сб. ст. по матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. – 2012. – № 8. – С. 10–107.
6. Львович Я.Е., Яковлев Д.С., Иохвидова А.Е. Многоальтернативная оптимизация средств защиты информации на основе методов риск-анализа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogoalternativnaya-optimizatsiya-sredstv-zaschity-informatsii-na-osnovemetodov-risk-analiza>, своб.
7. Двилянский А.А., Иванов В.А. Оптимизация системы защиты объектов инфокоммуникационных систем от кибертеррористических угроз // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3(77). – С. 118–125.
8. Bohme R., Moore T. Security Metrics and Security Investment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tylermoore.ens.utulsa.edu/courses/econsec/reading/Inse-secinv2.pdf>, своб.
9. Bistarelli S., Fioravanti F., Peretti P. Defense trees for economic evaluation of security investments // Proceedings of International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES'06). – 2006. – P. 423–430.
10. NSS Labs – the most trusted source for independent, fact-based cybersecurity guidance. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nsslabs.com/>, своб.
11. Кляус Т.К., Гатчин Ю.А. Определение вероятности реализации атак на информационную систему с помощью деревьев событий // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – 2018. – № 4(30). – С. 31–37.

**Минаева Тамара Александровна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N4259

Направление подготовки: 10.04.01 – Информационная безопасность

e-mail: minaeva-toma-ya@yandex.ru

**Волошина Наталия Викторовна**

Год рождения: 1976

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., доцент

e-mail: nataliv@yandex.ru

УДК 004.056.5

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОУРОВНЕГО ВСТРАИВАНИЯ ПРИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ РАЗНОЙ ДЛИНЫ****Минаева Т.А., Волошина Н.В.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Волошина Н.В.**

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований в 2018 году (грант 17-07-00849-А) в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

В работе акцент в исследованиях сделан на изучение особенностей метода многоуровневого встраивания авторской информации (WF5) во взвешенную структуру контейнера, при использовании помехоустойчивого кода Хэмминга с кодовым словом разной длины, при использовании взвешенной метрики. Основная цель исследования – оценить влияние длины кодового слова, а также используемой метрики, на качественные показатели встраивания (заметность искажений, объем встраивания). Исследование метода проводилось с различными длинами кодового слова: 7, 9 и 15 бит. Для всех вариантов используемых параметров кодов были разработаны эффективные взвешенные конструкции контейнеров (маски), которые соответствуют модели зрительной системы человека (HVS). Анализ проводился на различных типах тестовых изображений.

**Ключевые слова:** стеганография, цифровые водяные знаки, наименее значимые биты, стеганоанализ, многоуровневое встраивание, стегановставка, взвешенный контейнер, LSB, защита авторского права, WF5, контейнер.

На сегодняшний день не только существует, но и увеличивается проблема защиты авторских прав при распространении мультимедийных данных в современных телекоммуникационных системах. Одним из наиболее эффективных методов защиты мультимедийных данных является применение цифровых водяных знаков. Основная задача при встраивании цифрового водяного знака заключается в добавлении информации об авторе в исходные данные (контейнер) таким образом, чтобы встраиваемая информация полностью помещалась в контейнер и не влияла критически на качество защищаемого объекта. В некоторых системах встроенные водяные знаки должны быть устойчивы к искажениям, в других же они должны быть уничтожены при малейшем искажении исходного защищенного объекта.

Одним из самых распространяемых мультимедийных объектов являются изображения. Для них существуют два основных типа защиты: встраивание во временную область и в частотную область [1, 2]. Эти методы имеют ограничения на объем встраиваемой

информации. Эффективный объем контейнера, т.е. тот объем, в который фактически происходит встраивание, часто ограничивает объем вносимой информации. Например, при использовании распространенного метода LSB, для внесения авторской информации доступны только младшие биты. Простое расширение контейнера за счет более значимых бит приводит к значительному увеличению заметности вносимых искажений. Современные исследования посвящены поиску методов преодоления этих ограничений. Один из способов решения проблемы эффективности является применение многоуровневого подхода к встраиванию для защиты мультимедийных данных [3–5]. Под многоуровневым встраиванием подразумевается стеганографическое встраивание, в котором исходный объект (изображение, аудио- или видеоконтент), который должен быть защищен, можно разделить на несколько зон значимости. Каждая зона может использоваться для встраивания информации, но с различными характеристиками. Например, в зависимости от уровня битовой плоскости в изображении можно изменить количество бит, участвующих в процессе встраивания, тем самым уменьшая вероятность искажения битов в более высоких битовых плоскостях [3], при этом повышая эффективность, за счет снижения заметности внедренных в результате встраивания искажений при увеличении объема встраивания.

В настоящем исследовании для анализа подходов улучшения качества многоуровневого встраивания был использован стеганографический метод WF5, использующий коды с коррекцией ошибок [2, 6] во взвешенной метрике Хэмминга. Помехоустойчивые коды могут использоваться как для защиты водяных знаков от искажающих эффектов, так и для повышения эффективности встраивания путем оптимизации отношения объема встраиваемой информации к числу внесенных искажений с учетом особенностей восприятия искажений зрительной системой человека (HVS) [4, 5].

Для исследования были выбраны тестовые изображения формата BMP (без сжатия). В качестве рабочей области, куда будет встраиваться информация, используются биты цветовых компонентов пикселей изображения RGB. Для того чтобы встроить информацию методом WF5 необходимо построить специальную матрицу Хэмминга. Для разной длины кодового слова матрицы встраиваемости будут различаться размером и формированием столбцов. Так, к примеру, будет выглядеть матрица для кода длины 9:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для кодов, построенных во взвешенной метрике, кодовое слово состоит из бит с весом  $W_1$  (не значимые биты) и бит с весом  $W_2$  (более значимые биты). Причем биты с весом  $W_1$  набираются из наименее значимых бит контейнера, а биты с весом  $W_2$  из более значимых. Сам алгоритм встраивания информации представлен схематически на рис. 1.

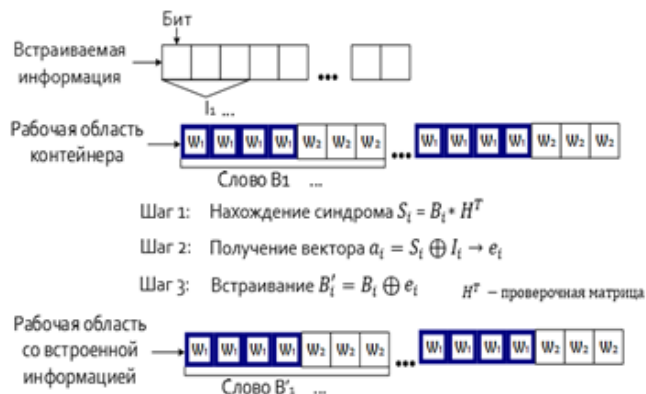


Рис. 1. Схема процедуры встраивания методом WF5 для длины кодового слова 7 бит

В рамках исследования для разных длин кодового слова были разработаны варианты формирования рабочей области изображения с взвешенным распределением бит (маски встраивания). Маски строились таким образом, чтобы кодовое слово формировалось из одного пикселя изображения, т.е. трех его компонент, что обеспечивает независимую защиту каждого пикселя изображения. А для сравнения методов с разной длиной кодового слова были сформированы варианты масок встраивания, при которых кодовое слово формировалось из первых трех или четырех битовых плоскостей. Некоторые варианты масок формирования рабочей области полноцветного изображения можно рассмотреть на рис. 2.

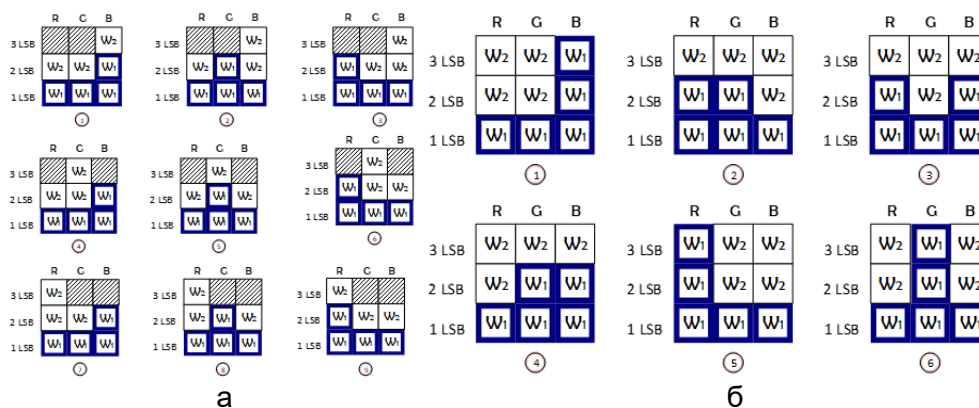


Рис. 2. Варианты формирования рабочей области: при длине кодового слова 7 бит (а); при длине кодового слова 9 бит (б)

Для того чтобы оценить уровень вносимых искажений при встраивании различной информации в исследовании применяется показатель визуального искажения PSNR (пиковое отношение сигнал/шум). Значения этого показателя лежат в промежутке от 0 до  $\infty$  и выражаются в децибелах. Если значение показателя опускаются ниже 30 дБ, то можно считать, что изображение сильно искажено, а искажения визуально заметны.

Исследование проводилось на различных типах тестовых изображений: портрет, пейзаж, текст и т.п., т.е. естественных фотографических цветных изображениях. В качестве встраиваемой информации использовались: текст, тестовые изображения различных типов, а также псевдослучайная последовательность бит, так как предполагается, что авторская информация может быть зашифрована. При увеличении длины кодового слова увеличивается и количество бит, которые могут быть встроены, так как увеличивается длина синдрома. На рис. 3 можно рассмотреть график, на котором представлены значения PSNR при встраивании информации методом WF5 при использовании кодов с длинами кодового слова 7 и 9 бит.

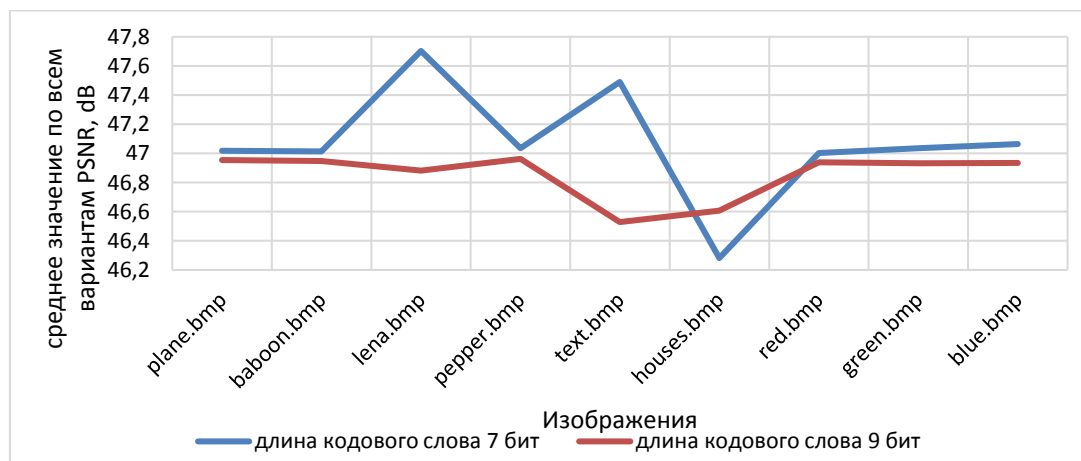


Рис. 3. График значений PSNR при разной длине кодового слова для Красной компоненты изображений

Как видно из графика, значения PSNR в обоих случаях не опускаются ниже 46 дБ, а это значит, что встраиваемые искажения визуально не заметны. Следует также заметить, что на графике представлены значения показателя визуального искажения при полном возможном заполнении контейнера. В случае с длиной кодового слова 7 бит и при сбалансированном варианте формирования рабочей области изображения в каждый пиксель изображения может быть встроено 3 бита информации, а при длине кодового слова 9 бит можно уже встроить 4 бита. Как можно увидеть на графике, значения показателя PSNR схожи в двух случаях, а это значит, что стало возможным встраивать на 15% больше информации, при этом сильно не искажая исходное изображение.

Вследствие того, что при длине кодового слова 15 бит встраивание осуществляется уже в битовой плоскости вплоть до четвертого уровня, значения показателя визуального искажения опускаются, но не ниже 39 дБ. Это существенно хуже, чем при встраивании 4 информационных бит с длиной кодового слова 9 бит. Поэтому из всех исследуемых длин для метода WF5 в данном исследовании самым оптимальным является кодовое слово длиной 9 бит.

Для цветных цифровых изображений были разработаны эффективные структуры (маски) взвешенных контейнеров, которые соответствуют модели системы человеческого зрения (HVS). Для различных типов тестовых изображений был исследован метод WF5 с разными длинами кодовых слов. В ходе исследования было выявлено, что оптимальной, с точки зрения соотношения объема встраиваемой информации и уровня вносимых искажений, длиной кодового слова является 9 бит. При данной длине кодового слова увеличивается объем встраиваемой информации на 15% и при этом показатель визуального искажения, измеряемый по метрике PSNR, не опускается ниже 46 дБ, что свидетельствует о визуальной необнаружимости встраивания. Таким образом, можно сделать вывод, что в сочетании с эффективными взвешенными контейнерами метод WF5 оптимально встраивает различную информацию и может быть применен на практике для защиты растровых изображений.

## Литература

1. Neeta D., Snehal K., Jacobs D. Implementation of LSB steganography and its evaluation for various bits // *Digital Information Management: 1st International Conference*. – 2006. – P. 173–178.
2. Westfeld A. High Capacity Despite Better Steganalysis (F5-A Steganographic Algorithm) // *Information Hiding. 4-th International Workshop. Lecture Notes Computer Science*, Berlin: Springer-Verlag. – 2001. – V. 2137. – P. 289–302.
3. Беззатеев С.В., Волошина Н.В., Минаева Т.А. Метод формирования многоуровневой структуры контейнера при встраивании ЦВЗ в цифровые изображения // *Конвергенция цифровых и материальных миров: экономика, технологии, образование. Сборник научных статей международной научной конференции*. – 2018. – С. 91–99.
4. Минаева Т.А., Волошина Н.В. Исследование многоуровневого встраивания в BMP-изображения // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. – 2018. – Т. 1. – С. 23–26.
5. Bezzateev S., Voloshina N., Zhidanov K. Steganographic method on weighted container // *Problems of Redundancy in Information and Control Systems (RED) XIII*. – 2012. – P. 10–12.
6. Minaeva T.A., Voloshina N.V., Bezzateev S. MLSB optimal effective weighted container construction for WF5 embedding algorithm // *Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2018 10th International Congress on*. – 2018. – P. 22–27.

**Мищенко Наталья Константиновна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N41501

Направление подготовки: 10.04.01 – Информационная безопасность

e-mail: mnk96@yandex.ru

**Кривцова Ирина Евгеньевна**

Год рождения: 1959

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, ст. преподаватель

e-mail: ikr@cit.ifmo.ru

УДК 004.02

**СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ELF-ФАЙЛОВ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАТОРА  
БАЙЕСА****Мищенко Н.К.****Научный руководитель – Кривцова И.Е.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 617026 «Технологии киберфизических систем: управление, вычисления, безопасность».

В современном обществе приходится обрабатывать и хранить огромные объемы данных. Для защиты хранимой информации от неправомерных действий требуется активное применение методов идентификации исполняемых файлов, что предотвратит возникновение новых уязвимостей в автоматизированной системе. Таким образом, можно утверждать, что необходимо периодически проводить мероприятия, направленные на проверку установленных программ с целью выявления несанкционированно установленных программ, а также обеспечения возможности создания автоматизированного средства контроля, устанавливаемого программного обеспечения. Целью данной работы являлось применение классификатора Байеса для идентификации ELF-файлов.

**Ключевые слова:** идентификация файлов, сигнатуры, ассемблерные команды, MATLAB, классификатор.

**Введение.** Большинство существующих в области идентификации программ научных работ нацелено на обнаружение вредоносных программ. Чаще всего для анализа используются такие методы, как побайтовое сравнение, сравнение контрольной суммы, а также сравнение цифровой подписи, но применение данных распространенных методов не является эффективным в виду отсутствия образца (эталона).

В данной работе объектом исследования являлись ELF-файлы. Предмет исследования – идентификация ELF-файлов. Цель исследования – применить классификатор Байеса для идентификации ELF-файлов. Научную гипотезу можно сформулировать следующим образом: если в дизассемблированном коде есть какое-то изменение и отличие от эталона, то можно предположить, что данная программа нанесет ущерб автоматизированной системе.

Актуальным является создание метода идентификации вне зависимости отношения к классу вредоносных программ [1]. Данный метод способен решить задачу инвентаризации и выявления несанкционированно установленных программ. В данной работе необходимо

было разработать способ идентификации не только вредоносных исполняемых файлов, но и идентификации программ вне зависимости от класса.

В работе рассмотрен файл формата ELF, который является наиболее распространенным форматом для Linux систем. ELF (Executable and Linkable Format) – формат, который был разработан и представлен UNIX System Laboratories.

Файл в этом формате содержит:

- elf header – заголовок файла;
- program header table – таблицу заголовков сегментов программы;
- section header table – таблицу заголовков секций программы;
- блоки данных.

Сегменты программы содержат информацию, используемую загрузчиком (Execution) программы, а секции – используемую компоновщиком (Linking). Общая структура ELF-файла изображена на рис. 1.

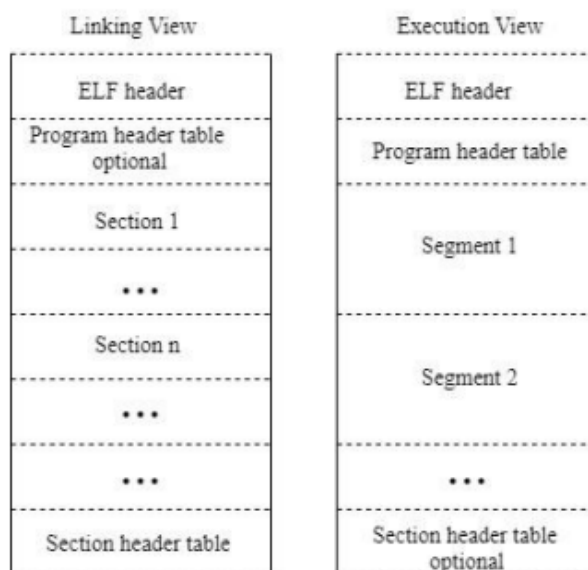


Рис. 1. Структура ELF-файла

Заголовок ELF находится в начале и содержит в себе информацию, описывающую организацию файла. Разделы же содержат основную часть информации о файле: инструкции, данные, таблицу символов, перемещение информации, и так далее. Информация, которая хранится в ELF-файле, организована в секции, имеющие свое уникальное имя. Все секции можно разделить на три вида:

1. секции, в которых хранится служебная информация;
2. секции, в которых хранится отладочная информация;
3. секции, в которых хранится код и данные программы.

Каждая запись, содержащаяся в таблице, имеет информацию: имя раздела, размер раздела. Таблица заголовков программы исполняемого файла представляет массив, где описывается каждый сегмент или другая информация, необходимая для выполнения и подготовки программы к выполнению. Каждый сегмент содержит не менее одного раздела. По таблице заголовков разделов можно найти расположение всех разделов в файле.

**Описание способа идентификации.** Рассмотрим способ идентификации исполняемых ELF-файлов на основе наивного классификатора Байеса. Для того чтобы произвести классификацию Байеса, необходимо построить сигнатуры ELF-файлов. Структура сигнатур имеет вид [2, 3]:

$$TS = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}, i = 1 \div m, \quad (1)$$



$$q_k = \begin{cases} a_k, & |\bar{a}_k - a_k| \leq 0,2 * \bar{a}_k, \\ 0, & |\bar{a}_k - a_k| > 0,2 * \bar{a}_k, \end{cases} k = 1-10, \quad (2)$$

$$p_k = \begin{cases} \bar{a}_k, & \sum_{j=1}^n \frac{q(f_j)[q_k]}{q(f_j)[q_k]} \geq 0,85 * n \\ 0, & \sum_{j=1}^n \frac{q(f_j)[q_k]}{q(f_j)[q_k]} < 0,85 * n. \end{cases} \quad (3)$$

По формулам (1)–(3) строятся неунифицированные сигнатуры, количество которых равно 443, и унифицированные сигнатуры, количество которых будет равно 213. Все полученные сигнатуры помещаются в два архива (унифицированный или неунифицированный) с целью дальнейшего обращения к ним для идентификации исполняемых файлов.

Далее необходимо произвести идентификацию сигнатуры идентифицируемого файла, построенной аналогичным способом, с сигнатурами из архива на основе наивного классификатора Байеса. В файле тестовой выборки находится 123 сигнатуры программ для каждой из 10-ти информативных ассемблерных команд, которые необходимо идентифицировать. В унифицированном архиве находится 213 сигнатур, а в неунифицированном – 443. Данные сигнатуры разделены по 10-ти ассемблерным командам.

Так как необходимо оценить, насколько корректно происходит классификация, нужно иметь файлы, содержащие названия программ. Благодаря сравнению имен программ, можно будет определить, правильно ли была произведена идентификация. Сравнение имен программ происходит только по имени программы, без учета версии. Например, программа `aspid_1.0.105ubuntu2.5_amd64` будет совпадать с `aspid`.

Сравнение файлов будет происходить с использованием формулы наивного классификатора Байеса. Рассмотрим формулу для расчета апостериорного максимума с целью определения наиболее вероятного класса  $H$ , учитывая задачу данного исследования [4–6]:

$$H_{map} = \arg \max [P(H) \prod_{i=1}^n P(W_i/H)],$$

где  $W_i$  – название программы (класс);  $H$  – частота признака.

Цель классификации состоит в том, чтобы определить с какой программой из архива совпадает программа тестовой выборки, а следовательно, требуется выделить наиболее вероятный класс. Как известно, байесовский классификатор использует оценку апостериорного максимума для определения совпадений. Так как безусловная вероятность встретить программу среди всех документов выборки является константой, то можно ее не учитывать.

Пусть  $A$  – один из классов, то

$$P(A) = \frac{D_A}{D},$$

где  $D_A$  – количество документов, принадлежащих классу  $A$ ;  $D$  – общее количество документов в обучающей выборке.

Данный метод классификации реализован с помощью встроенных средств MATLAB. В начале идентификации ELF-файлов необходимо считать унифицированные/неунифицированные сигнатуры, а также считать файлы, содержащие имена программ.

После проведения сравнения сигнатур ELF-файлов из обучающей выборки и архива, происходит преобразование результатов и подсчет значений TP и FN. В данной работе к TP относятся те результаты классификации, которые были верными. К FN же относятся те результаты, при которых классификация была ошибочной. В данном эксперименте TP – количество правильно идентифицируемых программ, а FN – количество неверно определенных программ.

**Схема эксперимента.** В ходе выполнения эксперимента было исследовано два архива сигнатур: унифицированный, состоящий из 213 сигнатур программ, и неунифицированный, состоящий из 443 сигнатур программ. В данных архивах использовались 182 ELF-файла различных версий и разрядностей (64x и 32x). Тестовая выборка состояла из 123 сигнатур программ, относящихся к 62 программам. Целью эксперимента была проверка работоспособности способа идентификации ELF-файлов на основе классификатора Байеса. На рис. 2 изображена схема процесса идентификации ELF-файлов.

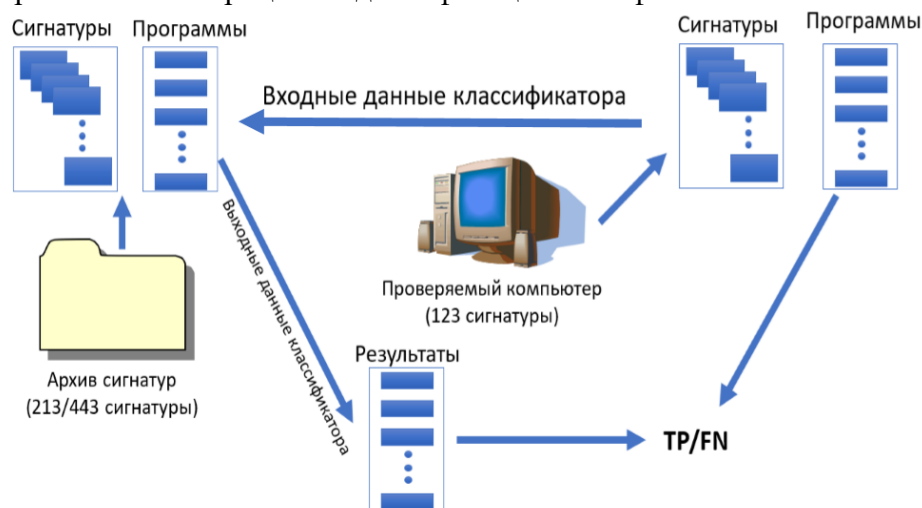


Рис. 2. Схема процесса идентификации

**Результаты эксперимента.** В эксперименте было использовано два параметра: *mn*, использующий полиномиальное распределение (обобщение биномиального распределения в случае эксперимента с несколькими возможными исходами), и *kernel*, использующий бимодальное распределение (плотность распределения имеет две вершины). Анализ результатов эксперимента по использованию наивного байесовского классификатора с целью идентификации ELF-файлов свидетельствует о том, что данный способ является наиболее успешным для сравнения неунифицированных сигнатур. После проведения идентификации была произведена оценка правильности идентификации файлов и получение значений правильно идентифицированных программ (TP) и неверно идентифицируемых (FN).

Результаты экспериментов представлены в табл. 1–3.

Таблица 1. Значения TP и FN при идентификации унифицированных сигнатур

Результирующие значения	Наименования ассемблерных команд				
	Add	and	Call	Cmp	Je
TP	63,41%	51,22%	56,91%	52,85%	57,72%
FN	36,59%	48,78%	43,09%	47,15%	42,28%
Результирующие значения	Наименования ассемблерных команд				
	Jmp	lea	Mov	Pop	Push
TP	52,03%	50,41%	48,78%	51,22%	43,90%
FN	47,97%	49,59%	51,22%	48,78%	56,10%

Таблица 2. Значения TP и FN при идентификации неунифицированных сигнатур с использованием параметра *kernel*

Результирующие значения	Наименования ассемблерных команд				
	Add	and	Call	Cmp	Je
TP	74,80%	67,48%	72,36%	69,11%	74,80%
FN	25,20%	32,52%	27,64%	30,89%	25,20%

Результирующие значения	Наименования ассемблерных команд				
	Jmp	lea	Mov	Pop	Push
TP	70,73%	61,79%	69,11%	64,23%	67,48%
FN	29,27%	38,21%	30,89%	35,77%	32,52%

Таблица 3. Значения TP и FN при идентификации неунифицированных сигнатур с использованием параметра *tn*

Результирующие значения	Наименования ассемблерных команд				
	Add	and	Call	Cmp	Je
TP	69,11%	65,04%	69,92%	73,17%	72,36%
FN	30,89%	34,96%	30,08%	26,83%	27,64%

Результирующие значения	Наименования ассемблерных команд				
	Jmp	lea	Mov	Pop	Push
TP	60,16%	47,97%	56,10%	63,41%	39,84%
FN	39,84%	52,03%	43,90%	36,59%	60,16%

Из приведенных данных следует, что наиболее оптимальным в целях получения наибольшего значения TP необходимо проводить идентификацию ELF-файлов с использованием неунифицированных сигнатур и применением параметра *kernel*.

**Заключение.** Для проведения эксперимента был выбран MATLAB с встроенными средствами для реализации наивного классификатора Байеса. Был выбран оптимальный параметр для реализации целей исследования. Разработан новый способ идентификации исполняемых файлов на основе наивного байесовского классификатора. Этот способ был подробно описан с использованием конкретных примеров. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что данный способ может быть применен в задаче идентификации исполняемых файлов, в частности при идентификации на основе неунифицированных сигнатур исполняемых файлов. Кроме того, данный подход к идентификации позволяет распознавать версии программного обеспечения, ранее не использованные в обучающей выборке.

### Литература

1. Антонов А.Е., Федулов А.С. Идентификация типа файла на основе структурного анализа // Прикладная информатика. – 2013. – № 2(44). – С. 68–77.
2. Кривцова И.Е., Салахутдинова К.И., Юрин И.В. Метод идентификации исполняемых файлов по их сигнатурам // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 1. – С. 215–224.
3. Салахутдинова К.И., Лебедев И.С., Кривцова И.Е. Подход к выбору информативного признака в задаче идентификации программного обеспечения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 278–285.
4. Гусак А.А., Бричикова Е.А. Теория вероятностей. Справочное пособие к решению задач. – Изд-е 4-е, стереотип. – Минск: ТетраСистеме, 2003. – 8 с.
5. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Высшая школа, 2004. – 407 с.
6. Айвазян С.А. Байесовский подход в эконометрическом анализе // Прикладная эконометрика. – 2008. – № 1(9). – С. 93–108.



**Чупров Сергей Сергеевич**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N4252

Направление подготовки: 10.04.01 – Информационная безопасность

e-mail: chuprov@corp.ifmo.ru



**Виксин Илья Игоревич**

Год рождения: 1992

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, к.т.н., н.с.

e-mail: wixnin@mail.ru



**Ким Юлия Вячеславовна**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N3451

Направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность

e-mail: yulia1344@gmail.com



**Усова Мария Андреевна**

Год рождения: 1999

Университет ИТМО, факультет безопасности информационных технологий, студент группы № N3251

Направление подготовки: 10.03.01 – Информационная безопасность

e-mail: girurer@gmail.com

**УДК 004.942**

**ЗАДАЧИ БЕЗОПАСНОГО ПРОЕЗДА ПЕРЕКРЕСТКОВ БЕСПИЛОТНЫМИ  
ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ В МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЕ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

**Чупров С.С., Виксин И.И., Ким Ю.В., Усова М.А.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Комаров И.И.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 617026 «Разработка методов интеллектуального управления киберфизическими системами с использованием квантовых технологий».

В ходе данной работы авторами разработана, описана и представлена модель системы управления движением беспилотных автономных транспортных средств на перекрестке в рамках концепции «умного» города. Также авторами был разработан программный симулятор проезда перекрестка беспилотными автономными транспортными средствами с использованием разработанной модели. С целью оценки целесообразности разработанной модели в симулятор была добавлена функция

организации движения на перекрестке с помощью обычных светофоров. В результате сравнения данных проведенных экспериментов был сделан вывод о целесообразности разработанной модели.

**Ключевые слова:** беспилотное транспортное средство, мобильная робототехническая система, перекресток.

**Введение.** Заторы на городских автомобильных дорогах создают множество проблем для жителей мегаполисов, от постоянных выбросов вредных веществ в атмосферу, до ежегодно увеличивающейся смертности в дорожно-транспортных происшествиях. Последние достижения в области искусственного интеллекта, робототехники и организации движения беспилотных транспортных средств сегодня позволяют человечеству создавать концепции «умных» городов, которые активно внедряются и, в ближайшем будущем, станут повсеместными [1].

Внедрение беспилотных автономных транспортных средств (БТС) на дороги общего пользования видится как одно из решений транспортных проблем крупных городов. Ни для кого не секрет, что сегодняшние системы управления БТС способны водить безопаснее, быстрее и оптимальнее чем человек, а оптимизация движения множества БТС в рамках города и использование электрических двигателей приведет к значительной экономии ресурсов и поможет сделать воздух над городом чище.

В настоящей работе авторами рассмотрены возможности создания интеллектуальной транспортной инфраструктуры в рамках концепции «умного» города с использованием киберфизических систем, подходы к решению проблем управления движением беспилотных транспортных средств на перекрестке. Перекрестки в городах с загруженным трафиком можно сравнить с бутылочными горлышками – траектории многих транспортных средств пересекаются, и возникает затор. С целью увеличения пропускной способности городских улиц, авторами была разработана модель системы, регулирующей движение транспортных средств на перекрестке. Для оценки целесообразности использования представленной модели также был разработан программный симулятор системы управления движением на перекрестке.

**Подходы к решению задачи управления движением БТС на перекрестке.** Создание и внедрение интеллектуальных транспортных систем нацелено на немедленное решение множества проблем, с которыми сталкиваются жители городов. К таким проблемам относятся пробки, низкая пропускная способность городских улиц, смертность в дорожно-транспортных происшествиях, загрязнение воздуха, шум и т.д. В рамках крупных городов, перекрестки вызывают особые проблемы, так как необходимо регулировать движение транспортных средств, движущихся одновременно с нескольких направлений, траектории движения которых могут пересекаться. Возникает необходимость расставлять приоритеты и регулировать движение транспортных средств. С целью решения этих проблем, научные сообщества изучают возможности создания системы, способной, используя беспроводную передачу данных в режиме реального времени, обмениваться данными с беспилотными транспортными средствами и строить оптимальные маршруты для увеличения пропускной способности городских перекрестков. Цель такой системы – обеспечить бесконфликтный и безопасный проезд нескольких транспортных средств через перекресток и сделать это оптимально. Ниже приведен краткий обзор нескольких исследований, рассматривающих возможность создания подобной системы.

Миллер и Хуан в работе [2] представили параметризованный кооперативный алгоритм предупреждения столкновений, функционирующий на основе динамических ad-hoc сетей и удобное программное обеспечение для обеспечения его работы. Алгоритм работает с использованием технологий DSRC (Dedicated short-range communication) и GPS (Global Positioning System). Серия предварительных испытаний показала, что система функционирует корректно.

Дрезнер и Стоун в серии работ [3–8] рассматривают проблему управления движением на перекрестке с точки зрения мультиагентного подхода. В своих работах авторы предложили разделить участников дорожной инфраструктуры на vehicle agents (VA), выполняющих роли обычных автомобилей и неподвижных reservation agents (RA), обеспечивающих динамическое управление ситуацией на перекрестке. Для того чтобы осуществить движение через перекресток VA необходимо отправить RA запрос на резервирование определенного участка дороги на перекрестке, по которому VA планирует двигаться в определенный момент времени. Эксперименты, проведенные с использованием программного симулятора, показали, что описанный авторами подход позволяет значительно повысить пропускную способность отдельного перекрестка по сравнению со светофором. На основании проведенного исследования авторами был предложен коммуникационный протокол обмена данными между VA и RA. В дальнейших исследованиях авторы рассмотрели возможность внедрения реальных водителей и транспортных средств специальных служб, имеющих преимущество перед другими участниками дорожного движения. Проведенные авторами исследования и практические результаты по большому количеству экспериментов нашли отражение в работе [9].

**Модель функционирования системы управления движением беспилотных транспортных средств на перекрестке.** Предлагаемая модель включает в себя множество БТС:  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  и множество объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ):  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ . Каждый ОТИ расположен на отдельном перекрестке и имеет возможность взаимодействовать со всеми транспортными средствами, в то же время БТС  $v_j$  может взаимодействовать только с одним ОТИ  $i_h$ . Общая площадь перекрестка разделена на небольшие участки местности – элементарные секции и может быть представлена как сумма  $S = s_1 + s_2 + \dots + s_k$ , где  $s_i, i \in [1, k]$  – площадь  $i$ -ой элементарной секции. Определено два варианта состояний элементарных секций на перекрестке:

1.  $s_i \cap s_j = \emptyset, i \neq j$ ;
2.  $s_i \cap s_j \neq \emptyset, i \neq j$ .

В рамках данного исследования, время  $t_v$ , затраченное БТС на преодоление маршрута должно стремиться к минимуму:  $t_v \rightarrow \min$ .

Соседние ОТИ обмениваются друг с другом информацией о загруженности перекрестка в данный момент времени и о маршрутах БТС, на основании этих данных текущий ОТИ, на перекресток которого планирует прибыть  $v_i$ -й БТС, строит для него оптимальный маршрут.

Для достижения поставленной цели были определены критерии функционирования системы, проиллюстрированные в формуле:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{waiting} \rightarrow \min \\ speed_i^{factual} \rightarrow speed_i^{expected}, i \in [1, n] \\ \sum_{u=1}^U s_{occ_u} \rightarrow \min \\ t_{intersection_i} \rightarrow \min, i \in [1, n] \\ t_{route_i} \rightarrow \min, i \in [1, n] \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $n_{waiting}$  – количество БТС, собирающиеся совершить проезд через перекресток;  $speed_i^{factual}$  – фактическая скорость  $i$ -го БТС;  $speed_i^{expected}$  – ожидаемая (идеальная) скорость  $i$ -го БТС;  $s_{occ_u}$  – количество занятых элементарных секций;  $u$  – общее количество элементарных секций на перекрестке;  $t_{intersection_i}$  – время проезда  $i$ -го БТС через перекресток;  $t_{route_i}$  – общее время, затраченное  $i$ -м БТС на преодоление маршрута.

Таким образом, БТС и объекты инфраструктуры выполняют взаимозависимые функции. Транспортные средства собирают данные о своем техническом состоянии и

движении, данные о траектории движения других БТС и передают их на ОТИ, хранят расположение дорог, по которым проходит маршрут. ОТИ хранят информацию о системе, разрабатывают локальные и глобальные оптимальные планы движения БТС по городу, контролируют ситуацию на отдельном перекрестке и обмениваются информацией с другими ОТИ.

**Проведение экспериментов и результаты.** Для оценки эффективности предложенной модели был разработан программный симулятор, имитирующий движение БТС в городе, в частности, их взаимодействие на перекрестках. Были определены следующие требования к виртуальному полигону:

- расположения и статусы всех элементарных секций известны всем участникам дорожного движения;
- начало дороги должно быть расположено на одной из границ виртуального полигона, в то время как ее конец должен быть расположен на противоположной стороне, т.е. предполагается, что есть только прямые дороги, координаты которых совпадают с координатами элементарных секторов, расположенных в той же строке или столбце;
- любая из дорог может быть либо горизонтальной, либо вертикальной (углы всех пересечений проезжих частей строго прямые).

Перекресток, разбитый на элементарные секции проиллюстрирован на рис. 1.

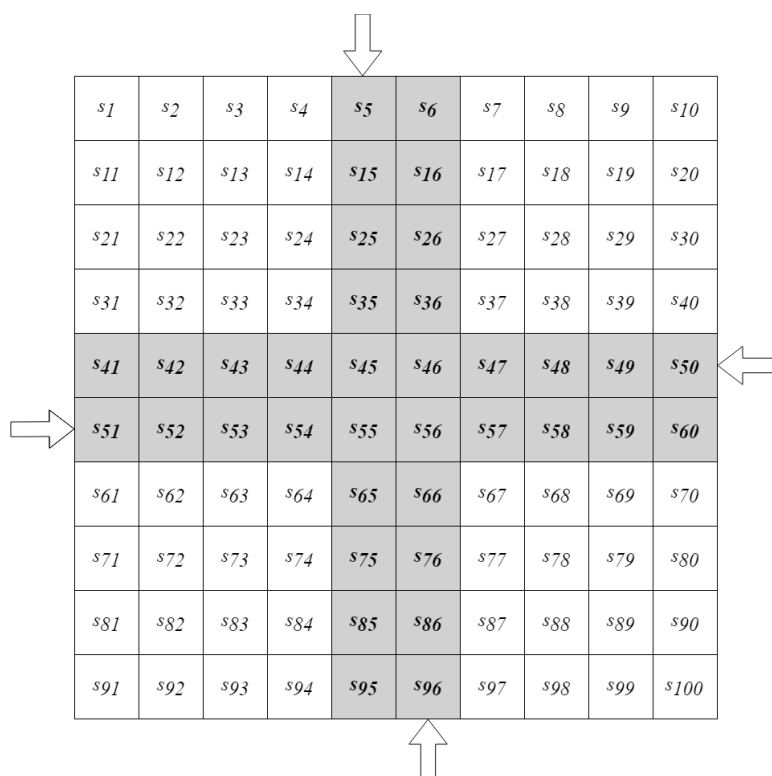


Рис. 1. Пример виртуального полигона для проведения экспериментов. Стрелками указаны направления движения БТС по дорогам виртуального перекрестка, разбитого на элементарные секции

Далее были определены следующие условия экспериментов:

- БТС могут двигаться только в направлениях, изначально заданных проезжими частями;
- территория полигона для движения БТС ограничена размерами полигона;
- количество БТС, одновременно находящихся на территории полигона ограничено количеством элементарных секций, которыми определяется территория полигона;

- в случае если на одну элементарную секцию претендует одновременно несколько БТС, предпочтение отдается тому БТС, который раньше отправил запрос на проезд через перекресток;
- в случае одновременного получения запроса от нескольких БТС на проезд перекрестка, решение по отношению очередности проезда принимается ОТИ в соответствии с критериями оптимальности.

Как было указано выше, с целью оценки эффективности представленной модели, в симулятор была добавлена функция управления движением на перекрестке с помощью светофоров. Среднее время пересечения перекрестка отдельным БТС было взято за критерий оценки эффективности используемой модели. Было проведено три группы экспериментов, по 1000 запусков в каждой, с различной вероятностью  $P$  появления нового БТС в очередную дискрету времени на перекрестке:  $P = 1$  (как минимум одно БТС появляется на перекрестке),  $P = 0,5$ ,  $P = 0,2$ . Длительность каждого отдельного запуска – 1000 дискретных единиц времени.

В результате, после обработки полученных данных каждого эксперимента и сравнительного анализа, данные приняли вид, представленный на рис. 2. Исходя из полученных результатов, представленная авторами данного исследования модель управления движением БТС на перекрестке позволяет в среднем снизить время проезда БТС через перекресток на 21%.



Рис. 2. Зависимость среднего времени, затраченного БТС на проезд перекрестка от вероятности появления нового БТС при разных схемах управления движением

**Заключение.** В настоящей работе авторы рассмотрели киберфизические системы в качестве основного компонента интеллектуальной транспортной системы. Перекрестки в мегаполисах являются генераторами пробок и заторов на дорогах, традиционные методы управления движением на них, такие как светофоры, не смогут справиться с задачей увеличения пропускной способности перекрестка в рамках концепции «умного» города. Однако с появлением БТС и систем управления, которые позволяют им эффективно и безопасно организовывать свое движение, стало возможным значительно повысить эффективность городских перекрестков. С целью решения проблемы авторами была предложена модель управления движением БТС на городском перекрестке. Для определения целесообразности представленной модели, был разработан программный симулятор отдельного перекрестка, управляемый на основе разработанной модели. Для сравнения эффективности представленной модели в симулятор была добавлена функция организации движения на перекрестке с помощью светофоров. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что представленная модель увеличивает пропускную способность перекрестка по сравнению с использованием светофоров в контексте данного исследования.

В будущих работах авторами планируется доработать симулятор с целью организации большего количества перекрестков для оценки эффективности модели в рамках всего города,

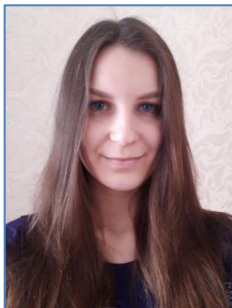


а также добавить более реалистичное поведение БТС, рассмотреть возможность внедрения в систему реальных водителей, пешеходов, общественного транспорта, автомобилей специальных служб и оценить их влияние на систему. Авторы также планируют разработать физический стенд для тестирования модели в реальных, не идеальных условиях.

### Литература

1. Камолов С.Г., Корнеева А.М. Технологии будущего для «умных городов» // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Экономика. – 2018. – № 2. – С. 100–114.
2. Miller R., Huang Q. An adaptive peer-to-peer collision warning system // Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002. – 2002. – V. 1. – P. 317–321.
3. Dresner K., Stone P. Multiagent traffic management: A reservation-based intersection control mechanism // Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2. – 2004. – P. 530–537.
4. Dresner K., Stone P. Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism // Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. – 2005. – P. 471–477.
5. Dresner K., Stone P. Human-usable and emergency vehicle-aware control policies for autonomous intersection management // Fourth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT). – 2006. – P. 17–25.
6. Dresner K., Stone P. Traffic intersections of the future [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aaai.org/Papers/AAAI/2006/AAAI06-258.pdf>, своб.
7. Dresner K., Stone P. Multiagent traffic management: Opportunities for multiagent learning // International Workshop on Learning and Adaption in Multi-Agent Systems. – 2005. – P. 129–138.
8. Dresner K., Stone P. Learning policy selection for autonomous intersection management // Pro. AAMAS. – 2007. – P. 34–39.
9. Dresner K., Stone P. A multiagent approach to autonomous intersection management // Journal of artificial intelligence research. – 2008. – V. 31. – P. 591–656.

**НАПРАВЛЕНИЕ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ**

**Борботько Виктория Александровна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р41775Направление подготовки: 12.04.01 – Приборостроение

e-mail: vik35ale@yandex.ru

**Помпеев Кирилл Павлович**

Год рождения: 1965

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: kir-pom@mail.ru

УДК 658.512.4

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ  
ДИАМЕТРАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ****Борботько В.А., Помпеев К.П.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Помпеев К.П.**

В работе представлено описание усовершенствованной методики расчета промежуточных диаметральных размеров и припусков. Методика основана на алгоритмах нового подхода, который подразумевает увеличение точности обработки поверхности на операции, предшествующей отделочной, при ее наличии в технологическом процессе.

**Ключевые слова:** технологический процесс, отделочные операции, припуски на обработку, расчет промежуточных диаметральных размеров, точность обработки.

На данный момент необходимо совершенствование способа расчета промежуточных диаметральных размеров и припусков, применяемого при проектировании технологий изготовления деталей, в состав которых входят операции отделочной обработки, так как при использовании известных методик получаются завышенные припуски по сравнению с производственными данными. В работе предложен новый подход, основанный на увеличении точности обработки поверхности на предыдущей операции по отношению к операции ее отделочной обработки.

Целью работы являлось совершенствование методики расчета промежуточных диаметральных размеров с учетом наличия в технологическом процессе отделочных операций, для этого был проведен анализ существующих методик расчета, рассмотрена практическая ситуация по реализации отделочной обработки на производстве и описаны предлагаемые изменения в методике.

Отделочные операции (суперфиниширование, хонингование, полирование и т.д.) характеризуются тем, что при их выполнении используется нежесткий инструмент. Основная цель таких отделочных операций состоит в обеспечении параметров шероховатости, требуемых по чертежу. При этом требования на взаимное расположение поверхностей и к их форме достигаются на операциях, предшествующих отделочным. Припуск на обработку отделочной операции следует оставлять незначительным – не более 0,1 мм на сторону.

Основой методики расчета является определение минимального припуска, который определяется после того, как установлены требования взаимного расположения

поверхностей. Структура припуска включает в себя равномерную (шероховатость, глубина дефектного слоя) и неравномерную часть. В отделочных операциях удаляется только равномерный слой материала. При этом на рассматриваемой обработке, проводимой в отделочной операции, удаляется только шероховатость, полученная на предыдущей обработке, а дефектный слой, также полученный на предыдущей обработке, не удаляется.

Общепринятая методика профессора Кована не подходит для расчета промежуточных диаметральных размеров и припусков, так как противоречит теории размерных цепей [1].

На рис. 1 показано сравнение двух ситуаций: расчет по альтернативной методике, представленной в [2, 3], и производственный случай, где можем наблюдать явно завышенный припуск.

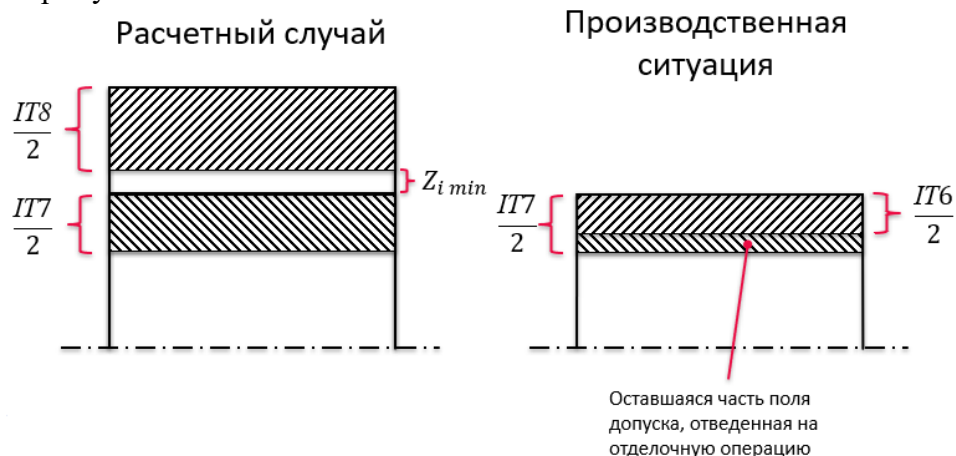


Рис. 1. Сравнение ситуаций

На практике сложилась следующая ситуация: для снижения трудоемкости отделочной операции и всего технологического процесса, операция, предшествующая операции отделочной обработки, выполняется точнее требуемой. Однако в этом случае при использовании альтернативной методики на прямую, возможна ситуация получения отрицательного минимального расчетного припуска, что является недопустимым. Для устранения этого недостатка предложен новый подход, учитывающий производственную практику по увеличению точности обработки поверхности на операции, предшествующей отделочной (рис. 2).

### Новый подход

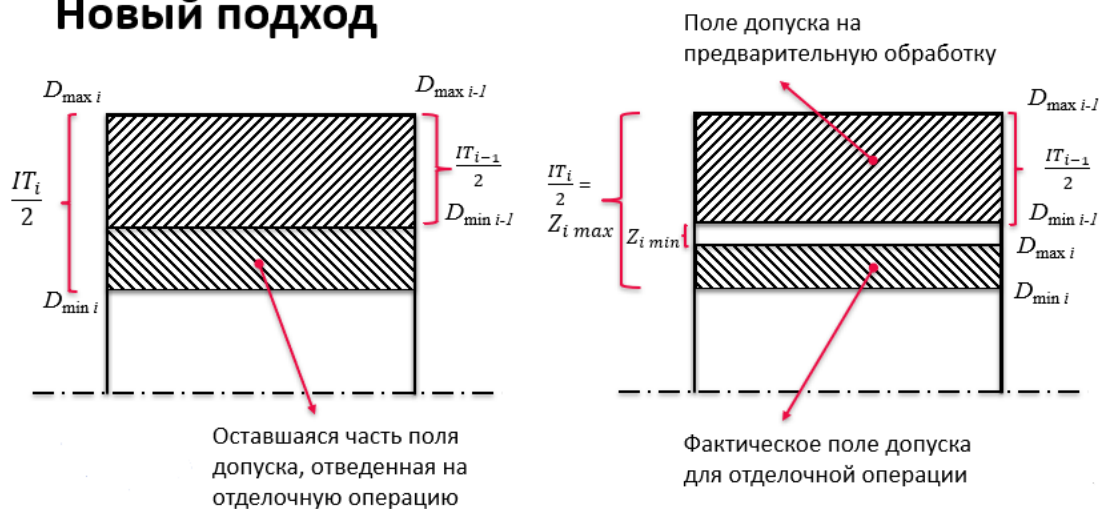


Рис. 2. Сравнение ситуаций нового подхода

При этом на предшествующей операции, например, шлифовальной достигаются требования взаимного расположения поверхностей и требования к их форме, а требуемая

шероховатость обеспечивается на отделочной операции, например, полировальной. Новый подход не противоречит формулам альтернативной методики.

Из основного поля допуска, выделенного на отделочную обработку, формируется поле допуска на предварительную обработку, которая будет точнее требуемой, минимальный припуск не более 1 мкм и фактическое поле допуска для отделочных операций. Анализ справочной литературы [4] показал, что 1 мкм это та величина минимального припуска, которой будет достаточно для обеспечения того требуемого качества поверхности.

В таблице приведен пример расчета по рассматриваемому подходу для диаметра 50h7, где можно увидеть, что полирование, которое следует выполнить по 7-му качеству, требуемому по чертежу, проводится в оставшемся поле допуска 7-го качества, в то время как основная его часть удаляется на предшествующей операции шлифованием, выполняемым по 6-му качеству. Другими словами обработка заготовки шлифованием с последующим полированием проводится в пределах поля допуска 7 качества и не выходит за его пределы.

Таблица. Пример расчета

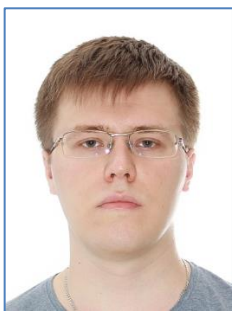
Ø50h7											
Маршрут обработки	Квалитет	№ операции	Диаметр, мм		Отклонение, мм	Составляющие припуска, мм			Z ( $i_{\max}$ расч)	Фактический припуск, мм	
			Расч.	Округл.		Rz ( $i-1$ )	h ( $i-1$ )	e ( $i_{\max}$ )		Z ( $i_{\min}$ факт)	Z ( $i_{\max}$ факт)
Полирование	(7)*	050	50	49,982***	-0,007**	0,001	0	0	0,001	0,001	0,013
Шлифование	6	045	50	50	-0,016	0,01	0,01	0,053	0,073	0,077	0,108
Точение	8	040	50,192	50,2	-0,046	...	...	...	...	...	...

\* Обработка в оставшемся поле допуска по h7.  
 \*\* Нижнее отклонение оставшегося поля допуска (0,025-2·0,001-0,016=0,007 мм).  
 \*\*\* 50-0,016-0,001·2=49,982 мм.

Таким образом, проведено совершенствование методики расчета промежуточных диаметральных размеров и припусков при наличии в технологическом процессе отделочных операций. Новый подход не противоречит формулам альтернативной методики, припуски на отделочную обработку получаются не завышенные, что снижает ее трудоемкость.

### Литература

1. Khalimonenko A.D., Pompeev K.P., Timofeev D.Y. Method of Calculating Intermediate Diametral Sizes and Allowances for Designing Technology of Manufacture of Details // *Advances in Engineering Research*. – 2017. – V. 133. – P. 312–317.
2. Валетов В.А., Помпеев К.П. Технология приборостроения. Учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.
3. Помпеев К.П. Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2013. – № 3. – С. 600–609.
4. Косилова А.Г. Справочник технолога машиностроителя / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещаревой. – в 2 т. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.



**Бурков Никита Юрьевич**

Год рождения: 1991

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41775

Направление подготовки: 12.04.01 – Приборостроение

e-mail: nikitaburkov@yandex.ru



**Афанасьев Максим Яковлевич**

Год рождения: 1986

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: amax@niuitmo.ru

УДК 004.421:621.3.049.75

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА БАЗЕ ИНТЕРНЕТ-ПРИЛОЖЕНИЯ**

**Бурков Н.Ю.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Афанасьев М.Я.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Работа посвящена рассмотрению отдельных аспектов реализации умного производства печатных плат на базе модульной технологической установки: приведение достоинств такого производства; выделение дополнительного функционала системы хранения компонентов, которая является одним из элементов этого производства; разработка предварительного списка требований к системе проектирования плат; выделение подструктур из общей организации системы.

**Ключевые слова:** печатные платы, умное производство, киберфизические системы, САПР, EDA.

Различные отрасли промышленности имеют большую потребность в применении печатных плат. И в связи с высоким темпом развития электроники спрос только увеличивается. Однако современное производство печатных плат (ПП) обладает рядом существенных недостатков, среди которых важно выделить долгое прохождение продукта через все этапы проектирования и производства, и высокая стоимость в итоге. Также можно отметить малое присутствие российской продукции на мировом рынке и удовлетворение преобладающей части спроса на ПП за счет импорта. Данные факторы ведут к инициативе создания производства, в условиях которого можно было бы сократить время проектирования и изготовления ПП, уменьшить затраты и в то же время сохранить высокое качество. Это было бы особенно актуально для создания прототипов экспериментального и мелкосерийного производства. Также организация такого производства актуально в рамках курса России на импортозамещение [1, 2].

Ключевыми элементами разрабатываемой концепции производства на данный момент являются:

- система автоматизированного проектирования (САПР) ПП;
- система хранения компонентов (СХК);

– установка селективного отверждения фотополимеров на базе модульной технологической установки (МТУ) [3].

Главная функция СХК – это, собственно, хранение данных об электронных компонентах, упорядоченных в библиотеки: параметры, физические размеры, обозначения в редакторе, различная метainформация. Стоит отметить, что в сети цифрового производства может быть запущено несколько инстансов данной системы, имеющих различную реализацию, но работающих по одному набору вызываемых методов, что отображено на рисунке.



Рисунок. Способы реализации системы хранения компонентов

Предлагаются следующие дополнительные функции системы:

- автоматизированное распределение данных по всем инстансам системы хранения;
- проведение резервного копирования данных;
- конвертация библиотек сторонних форматов, в том числе «на лету».

Установка селективного отверждения фотополимеров представляет из себя программно-аппаратный комплекс, построенный на базе модульной технологической установки и состоящий из двух частей:

1. шасси и универсальный модуль управления,
2. сменный модуль и соответствующее ему программное обеспечение (ПО) [4].

В качестве рабочего органа выступает интеллектуальная лазерная головка. Данный модуль обладает расширенными возможностями контроля рабочего процесса, самокалибровки и наладки. Двигаясь по определенной траектории, он осуществляет засветку фотополимера, нанесенного на пластину диэлектрика, и тем самым формирует пути дорожек питания [5].

Были разработаны следующие требования к разрабатываемой системе:

- «Бизнес-логика – в САПР» – все правила и принципы проектирования ПП будут содержаться непосредственно в системе проектирования – отсутствует необходимость какого-либо другого ПО и серверной логики. Данные из системы затем будут передаваться напрямую в установку в виде управляющей программы, закодированной с помощью G-кодов;

- весь программный код системы должен быть покрыт тестами;
- в процессе разработки необходимо пользоваться современными фреймворками, библиотеками, веб-технологиями;
- необходимо следовать принятым принципам разработки ПО и руководствам по стилю кода;
- важными требованиями к системе проектирования являются ее расширяемость (возможность добавления отдельных элементов в какую-либо систему) и масштабируемость (способность системы справляться с увеличением рабочей нагрузки при добавлении ресурсов).

Из этих требований закономерно вытекают следующие:

- модульная организация программного кода САПР – организация программы как совокупности небольших независимых блоков;
- свободная модель распространения и открытый свободный код.

Некоторые из выделенных модулей, входящих в систему проектирования:

- редактор принципиальных схем;
- редактор схем ПП;
- редактор обозначений компонентов;
- редактор библиотек компонентов;
- модули для поддержки различных форматов данных;
- модуль автоматической подготовки сопроводительной записки с указанием следующей информации: цвет паяльной маски, необходимость маркировки, тип фольгированного материала, вид переходных отверстий, диаметр сверления всех типов отверстий, способ разделения плат и т.п.

В настоящей работе были приведены достоинства реализации концепции цифрового производства ПП на базе МТУ. Выделен дополнительный функционал системы хранения компонентов. Разработан список требований, который поможет наиболее рационально подойти к дальнейшей разработке САПР. Выделены отдельные модули системы проектирования, которые впоследствии будут более детализованы – разбиты на меньшие подструктуры.

## Литература

1. Российский рынок печатных плат: взгляд производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.kit-e.ru/articles/circuitbrd/2006\\_6\\_8.php](https://www.kit-e.ru/articles/circuitbrd/2006_6_8.php) (дата обращения: 27.01.2019).
2. U.S. Electronic Design Automation Software Market Size and Forecast By Type, By End Use and Trend Analysis, 2015–2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4659620/u-s-electronic-design-automation-software-market> (дата обращения: 27.01.2019).
3. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В., Крылова А.А., Шорохов С.А. Применение микросервисной архитектуры при проектировании промышленного оборудования с числовым программным управлением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 87–97.
4. Афанасьев М.Я., Грибовский А.А. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 268–272.
5. Федосов Ю.В., Афанасьев М.Я. Интеллектуальная лазерная головка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 559–563.



**Вертегел Денис Александрович**

Год рождения: 1994

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
аспирантНаправление подготовки: 09.06.01 – Информатика и вычислительная  
техника

e-mail: vertegeldenis@gmail.com

**Томасов Валентин Сергеевич**

Год рождения: 1943

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: tomasov@ets.ifmo.ru

УДК 621.341.572

**ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ МНОГОФАЗНОЙ МАШИНЫ  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ  
Вертегел Д.А.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Томасов В.С.**

Одним из основных путей повышения качества прецизионного электропривода является минимизация пульсаций тока статора, генерируемых преобразователем частоты. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет применения многофазных машин переменного тока, а также за счет совершенствования алгоритмов управления преобразователями частоты. В работе рассмотрено влияние алгоритма пространственно-векторной модуляции на пульсации тока статора пятифазной машины переменного тока.

**Ключевые слова:** многофазный электропривод, пространственно-векторная модуляция, коэффициент вариации, прецизионный электропривод, инверторы напряжения.

К прецизионному электроприводу современных оптико-механических комплексов предъявляются все более высокие требования по обеспечению уникальной точности наведения в широком диапазоне регулирования скорости вращения в условиях переменной нагрузки на валу машины. Зачастую, наравне с точностными и динамическими характеристиками подобный электропривод должен обеспечивать высокую отказоустойчивость. Таким образом, возникает необходимость исследовать и совершенствовать не только алгоритмы управления, но и топологии инверторов напряжения, а также конструкции самих машин [1–3].

Современный прецизионный электропривод строится на базе моментных синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов. Такой подход позволяет существенным образом снизить наличие сухого трения и устранить люфт зубчатых передач, обеспечивая возможность регулирования координат движения в широком диапазоне и высокую надежность функционирования электропривода в предельно жестких условиях эксплуатации. В то же время при проектировании подобных приводов важно учитывать дискретность протекания электромагнитных процессов в энергоподсистеме. Импульсный режим работы преобразователей частоты, а также модуляция магнитного потока неоднородным зазором машины приводят к возникновению дополнительных пульсаций электромагнитного момента, что усложняет процесс управления и снижает точность работы всей системы в целом [1–3].

Многофазные машины обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными трехфазными машинами. К таким преимуществам следует отнести уменьшение амплитуды и увеличение частоты пульсаций крутящего момента, снижение токовой нагрузки на фазу без увеличения фазного напряжения, уменьшение уровня пульсаций тока, потребляемого от звена постоянного тока, а также повышение надежности [4].

Интересной возможностью в многофазном приводе является независимое управление гармоническими составляющими низкого порядка магнитного поля в воздушном зазоре машины. Если гармонические составляющие (кроме первой) установлены в ноль, уровень пульсаций крутящего момента может быть в значительной степени снижен. С другой стороны, за счет введения ненулевых гармонических составляющих низкого порядка и их взаимной синхронизации может быть достигнуто увеличение крутящего момента. Другая особенность многофазных систем связана с так называемыми многодвигательными приводами, что подразумевает независимое управление одним многофазным инвертором определенного количества многофазных машин, имеющих последовательно соединенные обмотки статора [4].

Для минимизации пульсаций формируемого вектора тока статора и, как следствие, пульсаций электромагнитного момента, а также повышения надежности всей системы предложено рассмотреть возможность применения в прецизионном электроприводе многофазных машин. Таким образом, целью работы являлось исследование влияния алгоритма работы инвертора напряжения на пульсации формируемого вектора тока статора прецизионного электропривода на базе многофазной машины переменного тока.

Важно отметить, что основными показателями качества электроэнергии, как правило, являются спектральные критерии – коэффициенты искажения (Total Harmonic Distortion, THD) тока и напряжения, которые оперируют только действующими значениями, не учитывая фазового спектра пульсаций. Однако основной задачей инверторов напряжения в системе частотно-регулируемого электропривода является формирование кругового годографа вектора тока статора, в силу чего подобные критерии не являются корректными источниками информации. В связи с вышесказанным оценку качества формируемого тока статора предлагается производить с помощью коэффициента вариации:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (|\mathbf{I}|(t) - \overline{|\mathbf{I}|})^2 dt}}{\overline{|\mathbf{I}|}},$$

где  $\overline{|\mathbf{I}|} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} |\mathbf{I}|(t) dt$  – среднее значение модуля вектора тока статора  $\mathbf{I}$  за период основной гармоники тока  $T_1$  в установившемся режиме работы [3].

Схема  $m$ -фазного инвертора напряжения представлена на рис. 1, а. Известно, что любую многофазную систему можно разложить на симметричные составляющие (рис. 1, б), при этом для трехфазной системы их только три – прямая, обратная и нулевая, в то время как в пятифазной системе появляются еще две чередующиеся последовательности. Таким образом, с увеличением числа фаз растет и число симметричных составляющих, при этом симметричную систему для каждой последовательности образуют одинаковые по модулю вектора, с фазным сдвигом  $\varphi_q$  друг относительно друга

$$\varphi_q = q \frac{2\pi}{m}; \quad m = 3, 4, 5, \dots; \quad q = 1, 2, 3, \dots, m,$$

где  $m$  – число фаз;  $q$  – порядковый номер симметричной составляющей.

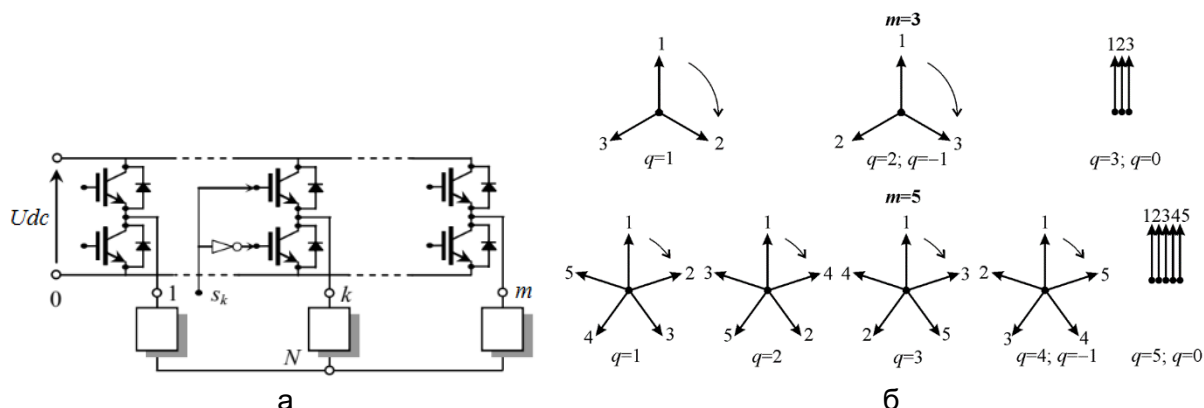


Рис. 1.  $m$ -фазный инвертор напряжения (а); симметричные составляющие трех- и пятифазной систем (б)

Из этого следует, что, в то время как традиционные трехфазные двигатели анализируются за счет представления основных величин в виде пространственных векторов только на одной плоскости  $dq$ , для многофазной системы этого представления оказывается недостаточно, и необходимо вводить дополнительные плоскости базовых векторов, чтобы отразить все симметричные составляющие [4].

Реализация алгоритма пространственно-векторной модуляции (ПВМ) основывается на представлении возможных состояний инвертора в виде векторов, называемых базовыми векторами. При этом сигнал модуляции также представляется вектором  $\underline{U}^* = U^* e^{j\theta^*}$ , который, вращаясь внутри области, ограниченной базовыми векторами, определяет величину среднего за период развертки фазного напряжения, равного его проекции на соответствующую фазную ось. Очевидно, что для формирования ненулевого базового вектора пять фазных обмоток двигателя, соединенных звездой, можно подключить к источнику питания только в виде двух возможных комбинаций (рис. 2), в результате чего напряжение звена постоянного тока  $U_d$  делится на обмотках двигателя либо как 1:5, либо 2:3 [5].

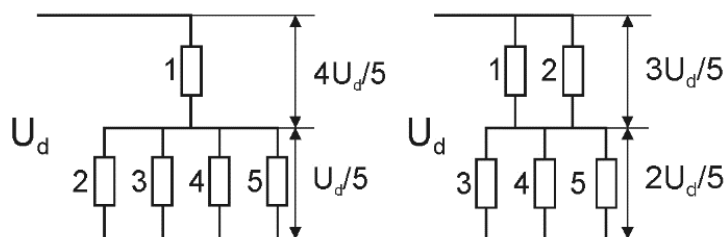


Рис. 2 Схемы подключения обмоток пятифазного двигателя

Однако при формировании базовых векторов важную роль играет не только величина напряжения, приложенного к каждой фазе машины, но и геометрическое положение оси каждой обмотки, в результате чего пятифазная конструкция машины позволяет сформировать 30 активных и два нулевых базовых вектора в двух плоскостях, каждая из которых представляет собой три десятиугольника, вписанные друг в друга (рис. 3). Каждый базовый вектор однозначно соответствует комбинации открытых силовых ключей инвертора, которая на рисунке указана двоичным числом у вершины каждого из векторов (1 соответствует открытому верхнему ключу соответствующей фазной стойки, 0 – нижнему). При этом несложно заметить, что каждая плоскость базовых векторов пятифазного инвертора соответствует четырехуровневому инвертору, однако сегменты имеют трапециевидальную форму, а длины векторов не кратны друг другу и равны  $0,247U_d$ ,  $0,4U_d$  и  $0,647U_d$ .



причиной перегрева обмоток двигателя, а также возникновению дополнительных пульсаций электромагнитного момента.

На рис. 4 приведены результаты математического моделирования пятифазной машины с ПВМ относительно индекса модуляции амплитуды  $Ma$ . Кривые, обозначенные цифрой 1, соответствуют алгоритму ПВМ, реализованному с учетом только одной плоскости базовых векторов  $d_1q_1$ , в то время как алгоритм 2 учитывает процессы формирования пространственных векторов в обеих плоскостях (при этом вектор модуляции в плоскости  $d_3q_3$  для алгоритма 2 был задан равным нулю).

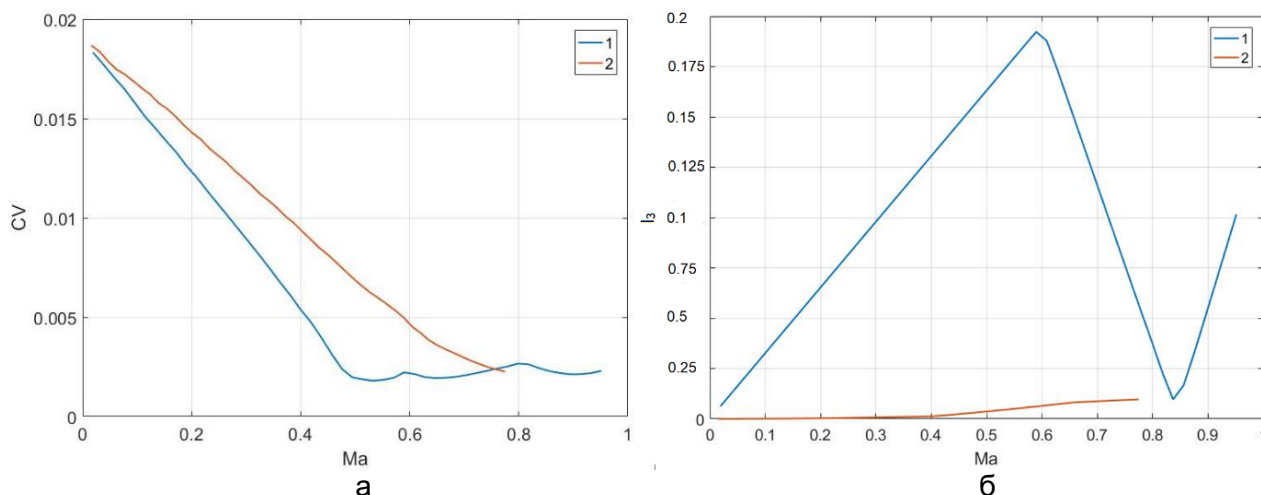


Рис. 4. Коэффициент вариации вектора тока статора (а); амплитуда 3-й гармоники фазного тока относительно номинального значения (б)

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что при реализации алгоритма управления, основанного только на одной плоскости базовых векторов, в фазном токе появляется третья гармоника, величина которой при заданном алгоритме ПВМ достигает почти 20% от номинального тока. В свою очередь, алгоритм 2, обеспечивающий подавление третьей гармоники фазного тока, имеет меньший диапазон регулирования, обеспечивая максимальную амплитуду фазного тока и напряжения примерно на 14% меньше, чем в алгоритме 1.

Таким образом, подводя итог, следует сказать, что применение многофазных машин в прецизионном электроприводе имеет ряд неоспоримых преимуществ, к которым, в первую очередь, относятся снижение уровня пульсаций электромагнитного момента, а также повышение надежности и коэффициента использования звена постоянного тока. Однако реализация энергоэффективных алгоритмов управления, обеспечивающих минимизацию пульсаций тока статора в широком диапазоне регулирования, существенным образом усложняется по сравнению с трехфазными многоуровневыми инверторами, так как требует учета большего числа симметричных составляющих, чем в трехфазном электроприводе.

### Литература

1. Томасов В.С., Усольцев А.А., Вертегел Д.А. Особенности использования многоуровневых инверторов в системах прецизионного сервопривода // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 12. – С. 1052–1059.
2. Lovlin S., Abdullin A. Adaptive system for compensation of periodic disturbances in servo drive // 9th International Conference on Power Drives Systems. – 2016. – P. 1–5.
3. Tomasov V.S., Usoltsev A.A., Vertegel D.A., Strzelecki R. Space vector modulation in multilevel inverters of the servo drives of the trajectory measurements telescopes // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – V. 60. – № 7. – P. 624–634.

4. Lega A., Mengoni M., Serra G., Tani A. and Zarri L. General theory of space vector modulation for five-phase inverters // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge. – 2008. – P. 237–244.
5. Xue S., Wen X. and Feng Z. Multiphase Permanent Magnet Motor Drive System Based on A Novel Multiphase SVPWM // CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai. – 2006. – P. 1–5.

**Гибадуллин Ильсур Наилевич**

Год рождения: 1993

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники  
аспирантНаправление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,  
оптические и биотехнические системы и технологии

e-mail: gibradullinilur@mail.ru

**Валетов Вячеслав Алексеевич**

Год рождения: 1937

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
д.т.н., профессор

e-mail: valetov.v@mail.ru

**УДК 621.914.1, 620.178.3, 620.191.355****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ  
С ЕЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ****Гибадуллин И.Н.****Научный руководитель – д.т.н., профессор Валетов В.А.**

Рассмотрены проблемы взаимосвязи микрогеометрии поверхности и функциональных свойств поверхности на примере трибологических свойств. Приведены основные этапы планируемого экспериментального исследования и ожидаемые результаты.

**Ключевые слова:** микрогеометрия, функциональные свойства, коэффициент трения, машина трения.

Работа любого изделия определяется в основном свойствами конструкционного материала, точностью размеров, формы и взаимного расположения сопрягаемых поверхностей деталей и состоянием их поверхностного слоя. Так как зависимость конкретного эксплуатационного свойства чаще всего многофакторная, оптимизация каждого из существенно влияющих факторов является актуальной задачей. Оптимизация поверхностного слоя деталей позволит значительно улучшить качество любых изделий [1], так как все воздействия на детали воспринимаются, прежде всего, их поверхностным слоем. Поэтому проблема улучшения поверхностного слоя деталей была, всегда будет актуальной. Задача авторов направлена на оптимизацию очень важной характеристики поверхностного слоя деталей – микрогеометрии их поверхностей. Выражение «оптимизация микрогеометрии поверхностей» практически предполагает определение наилучшей шероховатости в данных производственных условиях. Уже давно доказано, что микрогеометрия поверхности влияет на эксплуатационные свойства поверхности изделий [2, 3]. Под этим понимают зависимость свойств изделия от микрогеометрии функциональных поверхностей его деталей. Исследования этих свойств производились отечественными и зарубежными учеными-исследователями. В.Ф. Безъязычным, И.В. Крагельским, В.С. Комбаловым и Н.Б. Демкиным велись исследования шероховатости трущихся поверхностей. И.В. Дунин-Барковский вел исследования влияния шероховатости на контактную усталость поверхностей и коррозию металлов. Ю.Г. Шнейдером проводились исследования зависимости разнообразных эксплуатационных свойств поверхности с нанесенным регулярным микрорельефом (таких как, износостойкость, прирабатываемость, сопротивление ползучести, контактная

жесткость, коррозионная стойкость, а также оптические и электрические свойства). В.А. Красный и В.П. Булатов в своих работах исследовали процессы износа деталей в зависимости от микрогеометрии их поверхности. В.А. Валетов в своих трудах проводил исследования зависимости от микрогеометрии таких функциональных свойств, как усталостная прочность, коэффициент сопротивления качению, долговечность и других свойств. Проведенные исследования подтвердили существенное влияние микрогеометрии на функциональные свойства поверхностей. В то же время за рубежом активно изучали зависимости от микрогеометрии теплопроводности, гидродинамических, оптических, механических свойств поверхности.

На сегодняшний день уже вполне успешно решались задачи оптимизации микрогеометрии поверхности для конкретных функциональных свойств, но они носили несистематический характер, как правило, пытаясь лишь достичь максимального значения функционального свойства опытным путем, и не выявили технологических методов управления микрогеометрией поверхностей (а следовательно, и их функциональными свойствами). Целью данной работы являлось установление взаимосвязи между микрогеометрией функциональных поверхностей и коэффициентом трения поверхностей, изготовленных различными способами торцевого фрезерования.

Для достижения поставленной цели был разработан следующий план исследования:

1. изготовить образцы пар трения, обработав функциональные поверхности различными стратегиями фрезерования (с одинаковой скоростью и глубиной резания) и подачами в диапазоне 0,04–0,08 мм/зуб;
2. провести профильную и топографическую оценку функциональных поверхностей до испытаний на машине трения;
3. провести испытания на машине трения, фиксируя коэффициент трения, время работы и износ;
4. провести профильную и топографическую оценку функциональных поверхностей после испытаний на машине трения;
5. определить взаимосвязь измеренных значений коэффициента трения с микрогеометрией испытуемых образцов.

На рис. 1 представлены некоторые наиболее распространенные способы обработки торцевыми и концевыми фрезами.

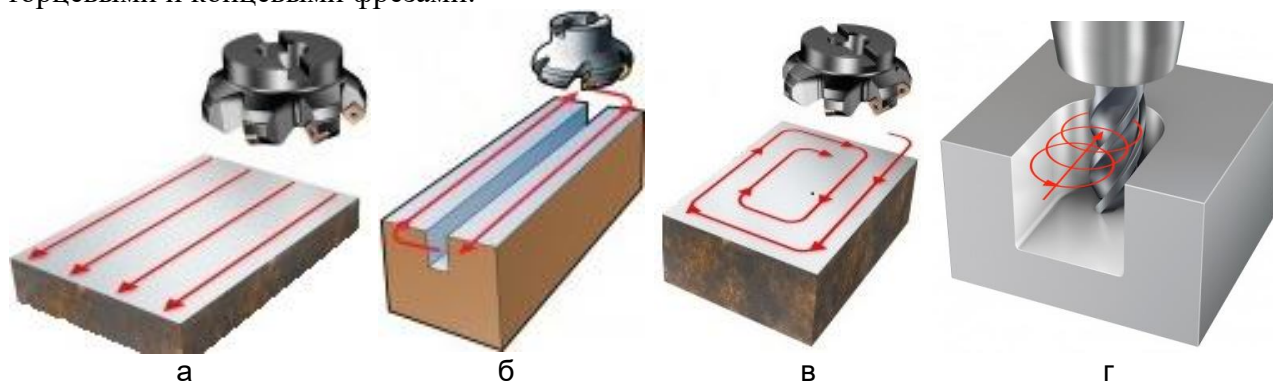


Рис. 1. Некоторые наиболее распространенные способы обработки торцевыми и концевыми фрезами: попутное фрезерование параллельными проходами (а); попутно-встречное фрезерование по зигзагообразной траектории (б); непрерывное попутное фрезерование от периферии к центру (в); трохоидальное фрезерование (г)

Во всех случаях использовались следующие режимы резания при обработке:  $n=5000$  об/мин;  $t=0,5$  мм,  $s=0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08$  мм/зуб.

В результате были получены следующие образцы, представленные на рис. 2.



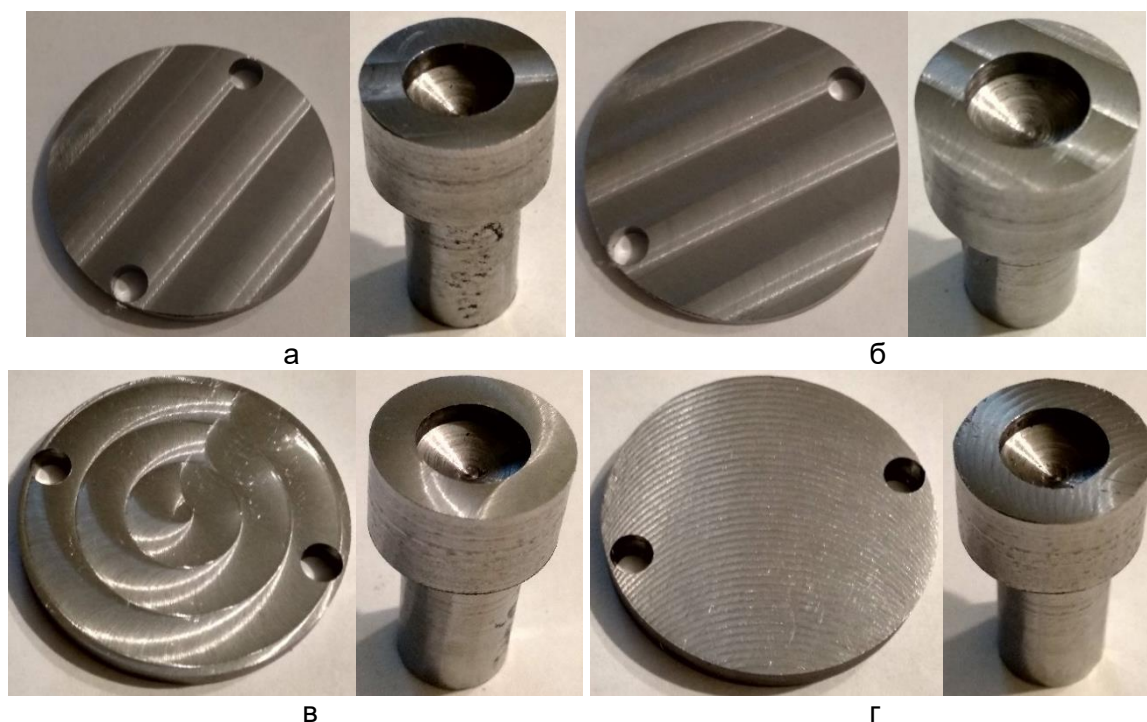


Рис. 2. Образцы (нижний – «диск», верхний – «подпятник»), полученные различными технологиями фрезерования: попутным фрезерованием параллельными проходами (а); попутно-встречным фрезерованием по зигзагообразной траектории (б); непрерывным попутным фрезерованием от периферии к центру (в); трохоидальным фрезерованием (г)

Испытания проводились на машине трения МТУ-1 [4]. Во время испытаний регистрировались следующие характеристики:

- время работы пары трения;
- коэффициент трения;
- весовой износ образцов.

Измерение микрогеометрии проводилось с помощью профилометра-профилографа NommelTesterT8000 [5]. Оценка микрогеометрии поверхностей проводилась двумя способами: общепринятыми параметрами шероховатости и с помощью графических критериев. При параметрической оценке использовались следующие параметры шероховатости:

- параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73;
- параметры шероховатости по стандарту ISO 4287-1997;
- параметры шероховатости, учитывающие трехмерную структуру поверхности по стандарту ISO 25178.

При оценке микрогеометрии с помощью графических критериев использовались следующие критерии:

- графики плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона неровностей профилей поверхностей;
- графики плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона неровностей микротопографий поверхностей;
- графические изображения профилей.

Полученные в ходе проведения данных испытаний результаты позволяют решить следующие задачи:

- определить взаимосвязь между микрогеометрией функциональной поверхности и коэффициентом трения поверхности;

- заложить основу для разработки системы допусков для графических критериев оценки микрогеометрии поверхностей;
- выявить способы «управления» функциональными свойствами поверхностей изменением ее микрогеометрии с помощью управления технологическими параметрами.

### Литература

1. Валетов В.А. Проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для обеспечения их конкретных функциональных свойств // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 4. – С. 250–267.
2. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
3. Валетов В.А., Гибадуллин И.Н. Шероховатость поверхностей деталей и качество функциональных свойств изделий // Металлообработка. – 2017. – № 5(101). – С. 38–43.
4. Perepelkina S., Kovalenko P., Pechenko R. Investigation of Tribological Properties of Metallic with the Use of the Universal Friction Machine «MTU-1» // Procedia Engineering. – 2017. – V. 176. – P. 301–309.
5. Гибадуллин И.Н., Валетов В.А. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости // Изв. вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 1. – С. 86–92.

**Гопанков Даниил Николаевич**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R4230Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: gopankov\_d@mail.ru

**Евстифеев Михаил Илларионович**

Год рождения: 1954

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
д.т.н., доцент;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», начальник отдела

e-mail: office@elprib.ru

УДК 629.5.066.52

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЫСТРОГО  
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АППАРАТУРЫ ВНУТРИКОРАБЕЛЬНОЙ  
СВЯЗИ****Гопанков Д.Н.** (Университет ИТМО), **Евстифеев М.И.** (Университет ИТМО; АО «Концерн  
«ЦНИИ «Электроприбор»)**Научный руководитель – д.т.н., доцент Евстифеев М.И.**  
(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Проведен обзор существующих на сегодняшний день технологий 3D-печати. Рассмотрены преимущества и основные типы аддитивных технологий в современном производстве. Показано, что использование технологий быстрого прототипирования позволяет в максимально короткие сроки создать прототипы готовых изделий и провести оценку их работоспособности для различных условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** быстрое прототипирование, аддитивные технологии, FDM-технология, аппаратура внутрикорабельной связи.

В мировой практике с аддитивными технологиями или с технологиями быстрого прототипирования (БП) связываются перспективы высокотехнологического развития и переход к новому технологическому укладу [1, 2]. На основе этих технологий базируются будущие конкурентные преимущества и новые возможности для многих отраслей. В исследовательских центрах ведущих зарубежных корпораций, таких как Boeing, General Electric, Lockheed Martin, Airbus выполняются масштабные научно-производственные разработки, направленные на создание специального оборудования и материалов, подготовку кадров и организацию производства изделий для практического использования. По некоторым оценкам они позволяют увеличить производительность труда в 30 раз, довести коэффициент использования материала до 98%, снизить массу конструкции на 50%.

Целью работы являлось определение возможности использования технологий БП для создания аппаратуры внутрикорабельной связи.

Технологии БП представляют собой процесс последовательного, послойного объединения материала с целью создания объекта, на основе спроектированной компьютерной 3D-модели в отличие от традиционных производственных технологий,

использующих процессы вычитания и формообразования, таких как механическая обработка заготовок, литье, сварка, склеивание и пр. [3, 4].

Способ послойного объединения материала или печати обуславливается экономическими факторами, ограничениями по времени производства детали, прочностными характеристиками изделий, видом материала и другими. Среди основных типов технологий, используемых в установках БП, можно назвать следующие:

- FDM (Fused Deposition Modeling) – построение модели послойной укладкой размягченной нагреванием полимерной нити;
- LOM (Laminated Object Manufacturing) – послойное склеивание пленочных материалов, например, полимерной пленки или ламинированной бумаги с последующим формированием («вырезанием») модели с помощью лазерного луча или режущим инструментом;
- SLA (Steriolithography Apparatus) – классическая стереолитография, способ получения моделей посредством отверждения тонкого слоя жидкого фотополимера лазерным лучом;
- SLS (Selective Laser Sintering) – послойное селективное (избирательное) спекание порошкового материала (пластика или смеси с металлическим порошком) под термическим воздействием луча лазера;
- PolyJet – метод многоструйного нанесения фотополимера многосопловой головкой с последующим отверждением слоя с помощью ультрафиолетовой лампы;
- МПТ (InkJet) – заливка слоя порошкового материала склеивающим составом, который подается многоструйной головкой.

Существует большое количество технологий, однако из всех представленных методов, технология экструзионной печати FDM является наиболее простой и бюджетной, из чего следует ее распространенность в современном мире и использование ее как в любительских, так и в профессиональных 3D-принтерах. На сегодняшний день 3D-принтеры именно этой технологии используются для создания прототипов различных изделий на предприятии АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и в Университете ИТМО [5].

Принцип работы технологии FDM заключается в горячей экструзии. С помощью экструдеров материал нагревается до температуры плавления, после чего подается через сопла экструдеров на матрицу, где постепенно слой за слоем создается прототип 3D-модели. Преимуществами данной технологии являются: высокая точность исполнения прототипа, высокая скорость 3D-печати, возможность использования широкого спектра полимеров с разными химическими и физическими свойствами (АБС пластик, PLA полилактид и т.д.).

Одной из основных видов продукции АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» являются комплексы внутрикорабельной связи, в состав которых в большом количестве входят телефонные трубки и микрофонные устройства. Прежние устройства поставляемых комплексов морально устарели и не отвечают современным требованиям эксплуатации.

Для поиска необходимой формы трубок и микрофонов и проверки их эргономических и эстетических характеристик были разработаны и изготовлены несколько итераций прототипов будущих изделий с использованием технологии БП на имеющемся в распоряжении оборудовании 3D-печати.

Использование 3D-моделирования и 3D-принтеров позволило избежать ошибок в разработке и производстве микрофонных устройств и телефонных трубок. С использованием изготовленных прототипов отработывался ряд конструктивно-технологических вопросов, которые невозможно решить на этапе моделирования. Среди этих вопросов следует назвать следующие:

- выбор эргономических характеристик для удобства использования аппаратуры и определение необходимой формы с учетом органолептических показателей;
- определение оптимального расположения элементов (наушников, микрофонов, переключателей и пр.) для обеспечения требуемых акустических характеристик;

- отработка вопросов внутренней и внешней герметичности к воздействию внешней среды (морская вода, туман, пыль и пр.) и подбор толщины резиновых прокладок;
- решение задачи заделки внешнего подводящего электрического кабеля для обеспечения прочности при эксплуатации и устранения обрывов кабеля;
- определение расположения крепежных элементов и закладных деталей для обеспечения прочности аппаратуры;
- отработка надежности и удобства крепления телефонных трубок и микрофонных устройств в собственных держателях в условиях вибрирующей палубы корабля. При этом в процессе проектирования держателей определялась корректность расчетов установки пружинных механизмов с роликами, уточнение конфигурации пружин и мест их крепления;
- обеспечение унификации крепления новых телефонных трубок и микрофонных устройств для использования в разработанной ранее аппаратуре внутрикорабельной связи.

На рис. 1, а, показан прототип телефонной трубки вместе с фиксирующим держателем, выполненный с использованием технологии БП. После нескольких итераций, изготовленных в короткий промежуток времени, была выбрана необходимая конфигурация, отработана технология и изготовлена из АБС пластика методом литья под давлением требуемая конструкция телефонной трубки (рис. 1, б), которая будет поставлена на серийное производство.



Рис. 1. Прототип телефонной трубки на основе технологии БП с держателем (а) и готовое изделие для серийного производства (б)

Аналогичная работа проведена с микрофонными устройствами. Благодаря изготовленным прототипам удалось успешно решить все конструкторско-технологические вопросы (рис. 2, а), после отработки которых изделия были запущены в серийное производство на Алтайском приборостроительном заводе «Ротор» (рис. 2, б).



Рис. 2. Прототип микрофонного устройства на основе технологии БП с держателем (а) и готовое изделие для серийного производства (б)

В результате проведенной работы сокращено время проектирования и выбора подходящего варианта изделия и значительно уменьшена трудоемкость конструкторской и технологической подготовки производства серийных изделий.

**Выводы.** Использование технологий быстрого прототипирования позволяет в максимально короткие сроки изготовить прототипы готовых изделий и провести оценку их работоспособности для различных условий эксплуатации при сокращении трудоемкости работ. В дальнейшем, в соответствии с тенденциями развития индустрии 3D печати, такие технологии займут доминирующее положение в производстве.

### Литература

1. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Ускорение развития аддитивных технологий в России // *Металлы Евразии*. – 2017. – № 3. – С. 3–6.
2. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: НАМИ, 2015. – 220 с.
3. Антонова В.С., Осовская И.И. Аддитивные технологии: учебное пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 30 с.
4. Белослудцев Е.В. Онлайн курс «Аддитивные технологии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.coursera.org/learn/additivnye-tekhnologii>, своб.
5. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Современный подход к конструированию навигационных приборов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://trudymai.ru/upload/iblock/070/Evstifeev\\_Eliseev\\_rus.pdf](http://trudymai.ru/upload/iblock/070/Evstifeev_Eliseev_rus.pdf), своб.

**Григорьев Игорь Станиславович**

Год рождения: 1992

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
аспирантНаправление подготовки: 27.06.01 – Управление в технических  
системах

e-mail: grigoryev.igor.st@gmail.com

**Ловлин Сергей Юрьевич**

Год рождения: 1987

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н.

e-mail: sjlovlin@corp.ifmo.ru

УДК 681.5.013

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ  
УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩИМ МОДУЛЬНЫМ ПРИВОДОМ ВЫСОКОТОЧНЫХ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****Григорьев И.С.****Научный руководитель – к.т.н. Ловлин С.Ю.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Рассмотрены различные структуры систем управления следящим электроприводом с использованием линейно-квадратичного регулятора. Осуществлен синтез и сравнительный анализ систем управления с внутренней моделью и системы с внешним контуром регулирования скорости.

**Ключевые слова:** следящий электропривод, линейно-квадратичный регулятор, система с внутренней моделью, робастное управление, подчиненное регулирование.

Развитие высоких технологий обуславливает непрерывное повышение требований к качеству работы современных систем автоматического управления (САУ) мехатронных систем, что приводит к уменьшению величины допустимого диапазона ошибок. При этом доля влияния нелинейности системы и неточности идентификации ее параметров увеличивается, ввиду чего необходимо учитывать данные аспекты при проектировании систем управления, поскольку они приводят к появлению статических ошибок, колебаниям в системе или потере устойчивости. Вышеописанные проблемы частично решаются применением методов робастного управления. В частности, такими методами являются применение линейно-квадратичного (ЛКР) [1] и линейно-квадратичного гауссова (ЛКГ) регулятора [2].

Задача синтеза САУ усложняется за счет наличия в объектах управления (ОУ) упругих связей, которые необходимо учитывать. Примером таких ОУ являются многозвенные манипуляторы, модели которых должны быть многомассовыми для учета скручивания сложной механической конструкции. Разработать наблюдатель для такой модели, восстанавливающий все неизвестные переменные состояния, не всегда представляется возможным. По этой причине задача синтеза ЛКР в системах с нежестким исполнительным механизмом, в котором нет возможности ни измерить все переменные состояния, ни построить наблюдатель, является актуальной.

**Описание объекта управления.** В качестве объекта управления предложен исполнительный механизм звена манипулятора, поскольку манипуляторы являются нелинейными ОУ ввиду постоянного изменения момента инерции нагрузки, вызванного изменением относительного положения груза и звеньев в пространстве. В манипуляторах, как правило, используются компактные двигатели с небольшим значением номинального момента, поэтому систему дополняют редуктором. Также необходимо учитывать и нежесткость механизма. С учетом приведения нагрузки к валу двигателя, исполнительный механизм можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{12} - M_{c1} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}(\omega_1 - \omega_2) \\ J'_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M'_{c2} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $J_1$  – момент инерции вала двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_1, \omega_2$  – скорость вращения вала двигателя и приведенной к валу двигателя нагрузки соответственно, рад/с;  $M_1, M_{12}, M_{c1}$  – моменты двигателя, упругих связей, нагрузки на валу двигателя соответственно, Н·м;  $M'_{c2}$  – приведенный к валу двигателя момент нагрузки;  $J'_2$  – приведенный к валу двигателя момент нагрузки;  $c_{12}$  – жесткость вала, Н·м/рад.

Резонансная частота механизма определяется формулой:

$$\Omega = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J'_2)}{J_1 J'_2}}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что изменение момента инерции нагрузки приведет к изменению резонансной частоты механизма, что может привести к потере устойчивости системой при стандартных методах настройки.

**Синтез системы управления следящим электроприводом с линейно-квадратичным регулятором.** Как сказано выше, при синтезе системы управления необходимо учитывать нежесткость механизма и его резонансную частоту. На практике при построении таких систем используют четырехконтурную систему регулирования положения. Особенностью настройки такой системы является настройка внутреннего контура скорости с учетом наименьшей резонансной частоты механизма. Методика такой настройки изложена в работе [3]. С учетом настройки по [3] можно представить контур регулирования скорости в упрощенном виде (рис. 1).

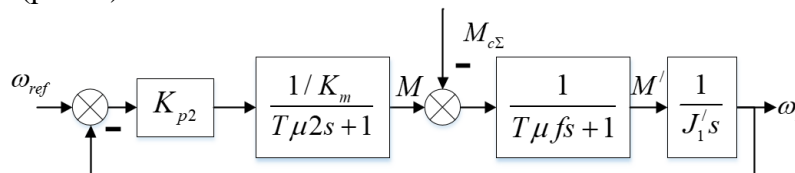


Рис. 1. Упрощенное представление контура регулирования скорости:

$K_{p2}$  – пропорциональный коэффициент регулятора скорости;  $T_{\mu 2}$  – постоянная времени контура регулирования момента;  $K_m$  – коэффициент передачи датчика момента;  $T_{\mu f}$  – постоянная времени механизма;  $J'_1$  – суммарный момент инерции вала двигателя  $J_1$  и приведенного момента инерции нагрузки  $J'_2$ ;  $M'$  – переменная, возникающая при редуцировании объекта

Исполнительный механизм аппроксимируется аperiodическим звеном с интегратором на выходе. Постоянная времени  $T_{\mu f}$  при этом рассчитывается по методике [3]. При этом учитывается резонансная частота механизма, которая зависит от  $J'_2$ .



Настройка [3] не обеспечивает робастность к изменению  $J_2$ , однако робастности можно добиться использованием ЛКР, но для этого требуется знать все переменные состояния объекта. Аппроксимированием механизма, согласно рис. 1, достигается редуцирование модели объекта, что избавляет от необходимости построения наблюдателя. При этом для перехода от упрощенной модели ОУ к полной модели объекта не хватает переменной состояния  $M'$ , которой нет в реальном объекте. Это решается добавлением в систему апериодического звена с постоянной времени  $T_{\mu f}$ .

С учетом вышеизложенного было синтезировано два варианта системы управления с линейно квадратичным регулятором. Рассмотрим их по отдельности.

Первым вариантом является замыкание внутреннего контура скорости по всем координатам и расчет коэффициентов обратной связи с учетом обеспечения критерия оптимальности (рис. 2).

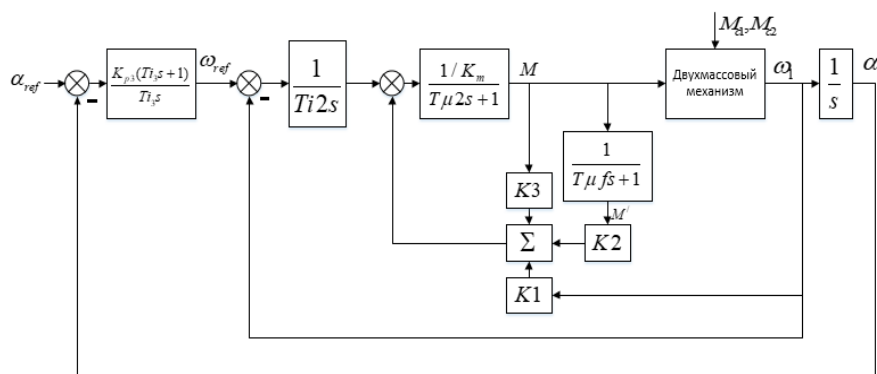


Рис. 2. Система регулирования угла с дополнительным скоростным контуром и полной моделью ОУ

Критерий оптимальности определяется следующей формулой:  $J = \int_0^{\infty} x^T Q x + u^T R u$ .

Для минимизации  $J$  рассчитывается уравнение Рикatti:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0. \quad (3)$$

Матрица коэффициентов обратной связи  $K$  рассчитывается исходя из  $P$ :

$$K = R^{-1} B^T P = [K1 \ K2 \ K3]. \quad (4)$$

Таким образом, настройка определяется матрицами  $Q$  и  $R$  задающими динамику системы и выбираемыми согласно требуемому характеру переходного процесса.

Для обеспечения астатизма по возмущению и заданию система на рис. 1 дорабатывается внешними контурами регулирования скорости и угла. Для настройки внешнего контура скорости системы на рис. 2 при расчете некомпенсированной постоянной времени учитывается самый медленный корень  $\lambda$  внутреннего контура скорости. Таким образом, некомпенсированная постоянная времени внешнего контура равна  $T_{\mu} = 1/\lambda$ . Угловой контур настраивается на симметричный оптимум.

Вторым вариантом системы управления является система с внутренней моделью (рис. 3).

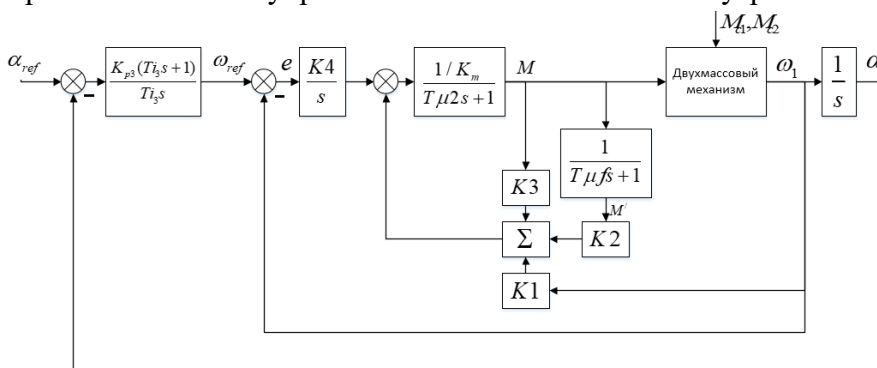


Рис. 3. Система регулирования угла с дополнительным скоростным контуром и полной моделью ОУ

Предложенный вариант структуры обеспечит астатизм первого порядка как по заданию, так и по возмущению, а также обладает увеличенной робастностью к изменениям параметров системы. В общем виде контур скорости представляется как на рис. 4.

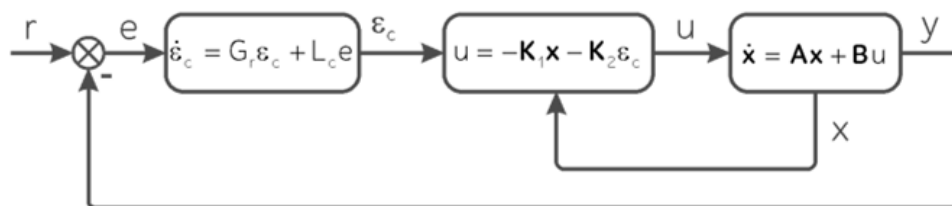


Рис. 4. Структура системы управления с внутренней моделью

В рассматриваемом нами случае модель возмущения будет представлена одним интегратором, которую можно представить следующими матрицами:  $G_r=0$ ,  $L_c=1$ .

Тогда объединенная система уравнений объекта и регулятора в векторно-матричном виде выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_1 & -BK_2 \\ -L_c C & G_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ L_c \end{bmatrix} r$$

$$y = Cx.$$

Для получения матрицы коэффициентов обратной связи  $K=[K_1 \ K_2]$  также применяются уравнения (3) и (4). Для настройки углового контура системы с внутренней моделью на симметричный оптимум при расчете некомпенсируемой постоянной времени учитывается самый медленный корень  $\lambda$  контура скорости.

Необходимо отметить, что, несмотря на внешнее сходство моделей на рис. 5 системы получаются разные ввиду самого алгоритма синтеза системы управления, поскольку в системе с внутренней моделью корни системы настраиваются с учетом внутренней модели генератора задания, что более оптимально, чем настройка внешнего скоростного контура.

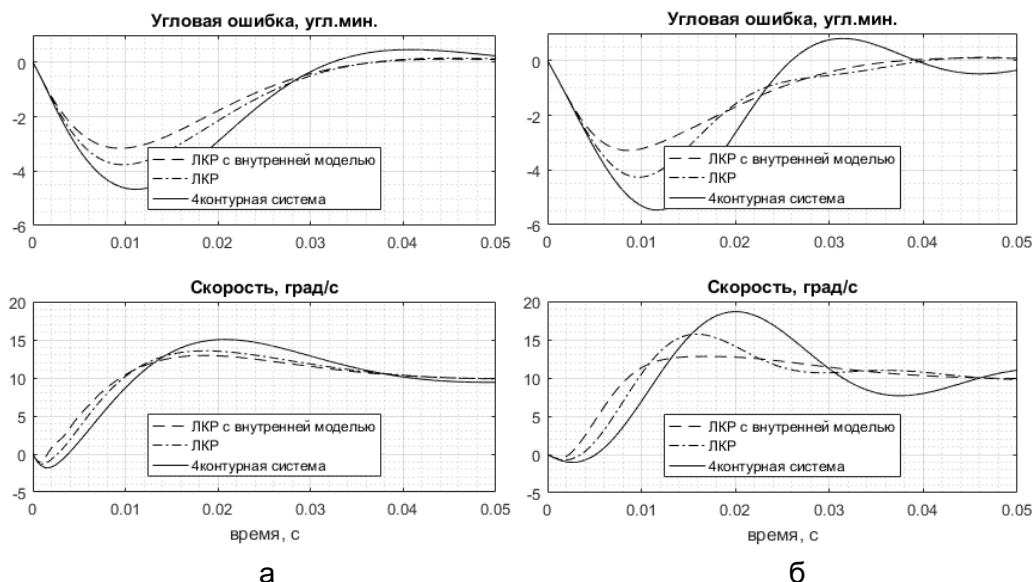


Рис. 5. Реакции системы на линейно-возрастающее задающее воздействие при:  $J_2=0,5J_{2ном}$  (а) и  $J_2=1,7J_{2ном}$  (б)

**Сравнительный анализ поведения систем управления следящим электроприводом с линейно-квадратичным регулятором в типовых режимах слежения.** При проведении моделирования использовался ОУ со следующими параметрами:  $J_1=4,92 \cdot 10^{-6}$  кг·м<sup>2</sup>,  $M_{c1}=0,001$  Н·м,  $M'_{c2}=0,4$  Н·м,  $J'_2=4 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup>,  $c_{12}=1800$  Н·м/рад. Параметры двигателя КВМ-10:  $M_{max}=1,17$  Н·м,  $M_{ном}=0,487$  Н·м.

Для системы на рис. 4 и на рис. 6, а, были получены матрицы **Q1**, **R1** и **Q2**, **R2**, соответственно:

$$Q1 = \begin{pmatrix} 0,03 & 0 & 0 \\ 0 & 0,07 & 0 \\ 0 & 0 & 0,07 \end{pmatrix}, \quad Q2 = \begin{pmatrix} 8 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,007 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,7 \cdot 10^5 \end{pmatrix};$$

$$R1 = R2 = 0,07.$$

При таких параметрах матрицы **K1** и **K2** соответственно равны:

$$K1 = [0,67 \ 1,38 \ 0,51], \quad K2 = [6,85 \ 9,12 \ 4,27 - 4 \cdot 10^3].$$

Синтезированные системы были промоделированы при линейно-возрастающем задающем воздействии, скачке возмущающего воздействия, а также при изменении параметров нагрузки – момента инерции.

При линейно-возрастающем задающем воздействии (рис. 6, а) системы показывают близкие значения времени переходного процесса и требуемого максимального момента двигателя. Однако в то же время системы с ЛКР, в особенности система с внутренней моделью показывает меньшую величину ошибки в переходном процессе. Справедливо будет отметить, что данная реакция системы не иллюстративна в полной мере, поскольку настройка системы управления может проводиться различными методами, в том числе для классической четырехконтурной структуры (рис. 1) существует алгоритм настройки на большее быстродействие согласно методике [4].

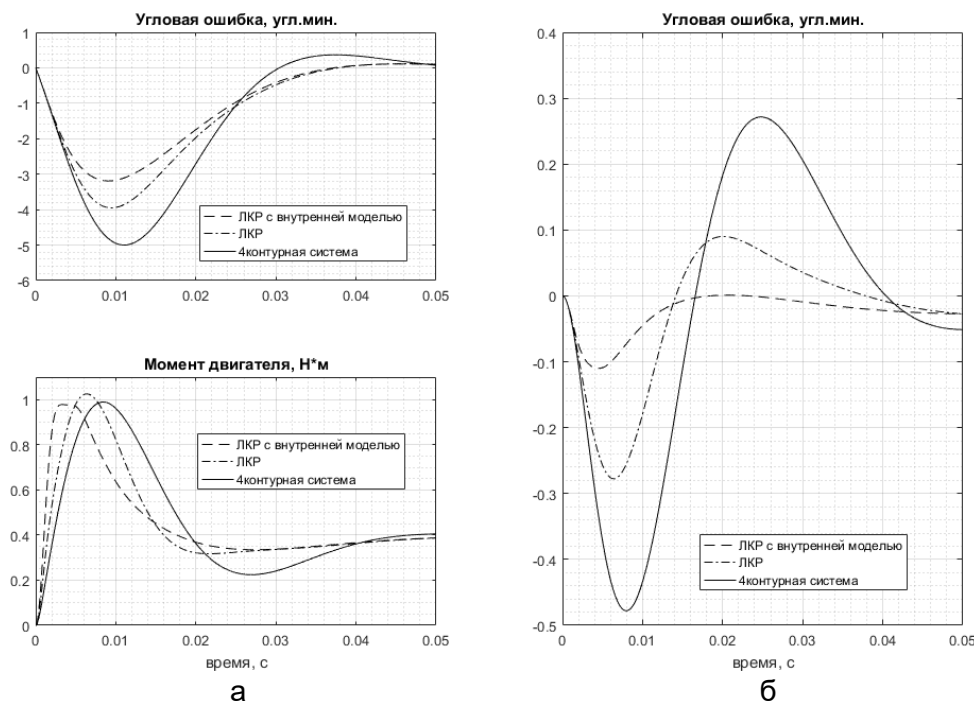


Рис. 6. Реакции систем на линейно-возрастающее задающее воздействие (а) и на скачок возмущающего воздействия (б)

Более показательной является реакция систем на скачок возмущающего воздействия (рис. 6, б). В данном случае явно видно, что система с внутренней моделью обеспечивает почти пятикратное уменьшение величины динамической ошибки угла относительно классической четырехконтурной системы управления и более чем двукратное относительно системы с внешним контуром скорости, причем данные характеристики достигаются при близких по значению других характеристиках системы, что было показано на рис. 6, а.

Также было проведено моделирование системы при изменении момента инерции второй массы, что является нелинейностью, характерной для таких ОУ, как манипуляторы (рис. 6, а).

Как видно из результатов моделирования системы с ЛКР более робастны к увеличению момента инерции нагрузки, особенно хорошо показывает себя система с внутренней моделью, переходный процесс в которой практически не изменяется при изменении данного параметра. В то же время при уменьшении момента инерции нагрузки все системы обеспечивают заданное качество переходного процесса. Таким образом, настройка с использованием линейно-квадратичного регулятора с внутренней моделью позволяет настраивать систему на большее быстродействие за счет большей ее робастности к изменению параметров механизма.

В результате исследования линейно-квадратичного регулятора был осуществлен синтез, проведено математическое моделирование и анализ процессов слежения в различных структурах систем управления следящего электропривода с линейно-квадратичным регулятором.

Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что система с ЛКР и внутренней моделью обладает наибольшей робастностью к изменению момента инерции нагрузки и обеспечивает наименьшую величину динамического отклонения угла из всех рассмотренных структур.

### Литература

1. Ruderman J., Krettek J., Hoffmann F. and Betram T. Optimal State Space Control of DC Motor // Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control. – 2008. – P. 5796–5801.
2. Ильина А.Г., Ловлин С.Ю., Тушев С.А. Синтез ЛКР-регулятора прецизионного следящего электропривода оси телескопа траекторных измерений // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 6. – С. 86–91.
3. Толмачев В.А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 3. – С. 68–72.
4. Шустов И.В., Толмачев В.А. Синтез четырехконтурной системы управления следящего электропривода системы наведения телескопов траекторных измерений // Навигация и управление движением. Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием. – 2018. – С. 205–207.

**Данг Нянь Тхонг**

Год рождения: 1990

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, аспирант

Направление подготовки: 15.06.01 – Машиностроение

e-mail: andretdang.spb@mail.ru

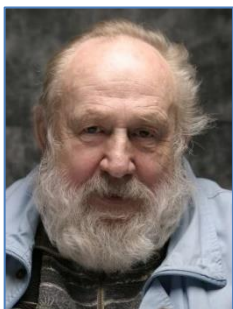
**Чан Минь Хуан**

Год рождения: 1977

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, аспирант

Направление подготовки: 15.06.01 – Машиностроение

e-mail: thongdragon.vn@sibmail.com

**Тимофеев Борис Павлович**

Год рождения: 1937

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, д.т.н., профессор

e-mail: timborp@rambler.ru

УДК 621.833

**УВЕЛИЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИБЛИЖЕННОГО  
ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ КОНТАКТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ****Данг Нянь Тхонг, Чан Минь Хуан, Тимофеев Б.П.****Научный руководитель – д.т.н., профессор Тимофеев Б.П.**

Предложены круговая и параболическая модификации для цилиндрических прямозубых колес. Проанализированы методы локализации пятна контакта и устранения кромочных контактов. На основе решения задачи Герца построены математические модели зубчатых зацеплений в программе MathCad, с помощью которых рассчитаны коэффициент перекрытия с учетом контактных деформаций. Определены допустимые значения параметров модификации. Контактные напряжения приняты равными допускаемым при расчете на многоцикловую усталость. Проанализировано влияние контактной деформации на нагрузочную способность несопряженных передач.

**Ключевые слова:** локализации пятна контакта, приближенные зубчатые передачи, решения задачи Герца, PTC MathCad, круговая и параболическая модификации, нагрузочная способность, коэффициент перекрытия.

В сопряженных передачах контактирующие поверхности зубьев являются взаимоигибаемыми в относительном движении. Серьезный недостаток сопряженного зацепления – невозможность избежать кромочного касания и кромочного удара на входе зубьев в зацепление и кромочного контакта на выходе зубьев при наличии срединного удара [1]. Из-за погрешностей изготовления, монтажа и деформаций под нагрузкой для этих передач характерны кромочные контакты (рис. 1). При кромочном контакте контактные напряжения теоретически бесконечно высоки, что в итоге приводит к снижению долговечности передачи.

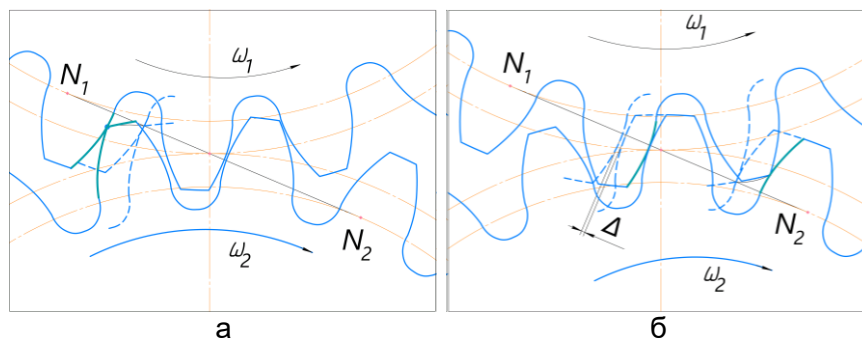


Рис. 1. Кромочный контакт на входе зацепления (а) и срединный контакт зубьев (б)

В передаче с локализованным контактом пересопряжение сопровождается «мягким» ударом. Ускорение при пересопряжении точки контакта меняется скачком на конечную величину. Фактическое изменение скорости ведомого звена можно определить решением задач динамики, однако, это возможно лишь при известных инерционных параметрах передачи и характере нагружения. В данном случае речь идет о выборе параметров в процессе проектирования передачи.

Цель работы – повышение нагрузочной способности передачи за счет увеличения коэффициента перекрытия. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- определение расчетных параметров модификации поверхностей в соответствии с новым стандартом ГОСТ 13755-2015;
- анализ влияния контактной деформации зубьев на процесс пересопряжения передач;
- определение эффективности применения различных видов модификации в зацеплении.

Продолжительность зацепления пары зубьев в упругой модели больше углового шага и зависит от нагрузки, а не является чисто геометрической характеристикой механизма. Пятно контакта на зубе (рис. 2) состоит из трех участков, соответствующих последовательно двухпарному, однопарному и вновь двухпарному зацеплению.

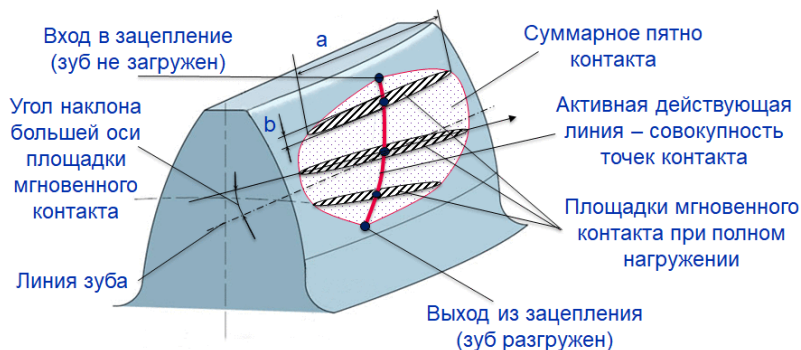


Рис. 2. Пятно контакта на зубе

В жестком зацеплении одновременно контакт осуществляется лишь одной парой зубьев, т.е. коэффициент перекрытия  $\epsilon$  жесткого зацепления может быть только равен единице [2]. Следовательно, чтобы увеличить  $\epsilon$ , необходимо использовать податливость, иными словами – за счет упругой деформации зубьев.

Деформация зубьев вызывает отклонение угла поворота колеса от номинального значения. Отклонение  $\Delta\varphi$  представляет собой функцию от угла поворота шестерни  $\varphi_1$  и может быть представлено графически (рис. 3).

На графике функции ошибки положения видно, что сближение зубьев за-за деформации приводит к перекрытию фаз зацепления соседних пар зубьев, т.е. появляется зона двухпарного зацепления.

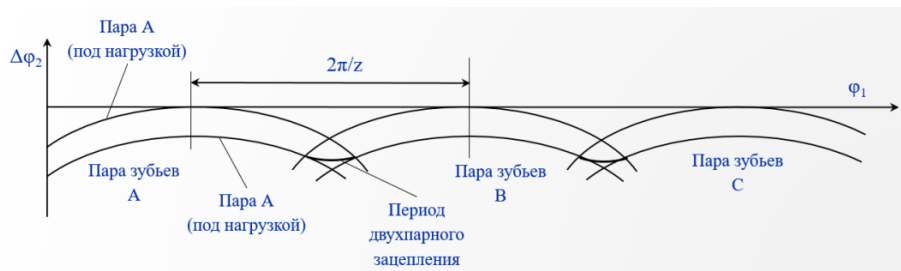


Рис. 3. График функции ошибки положения с участками двухпарного контакта

Недостатком сопряженного зацепления является присутствие кромочного касания на входе или на выходе зубьев из зацепления, что резко снижает качество передачи [3]. Для устранения этого недостатка необходимо исключить контакт на любой (включая границу активной и переходной поверхности) из кромок зубьев путем применения соответствующих модификаций (рис. 4). Была рассмотрена только профильная модификация, исключая контакты на кромках, образованных боковой поверхностью зуба с поверхностью выступов и с переходной поверхностью, и два варианта: круговая и параболическая модификации.

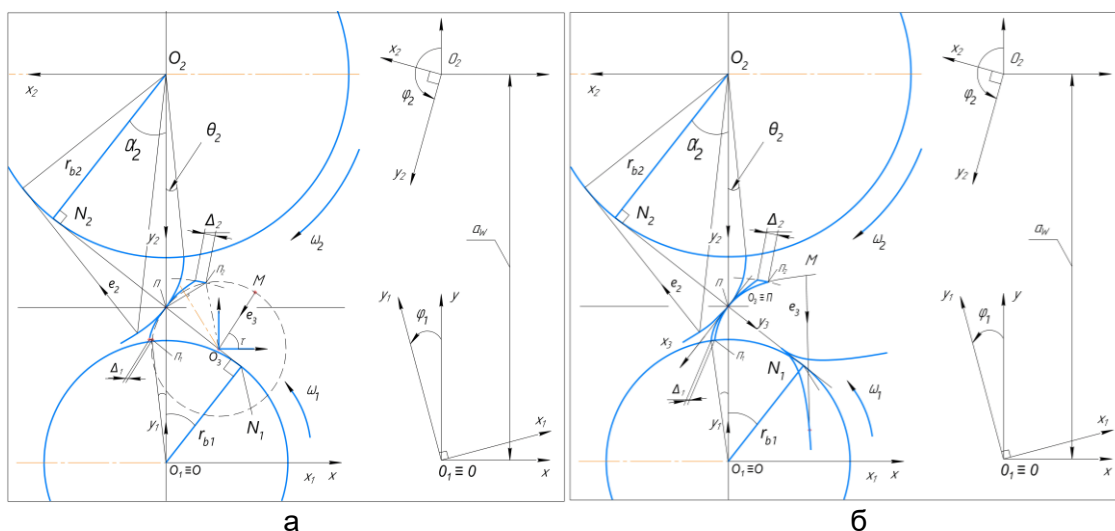


Рис. 4. Круговая (а) и параболическая модификация (б)

Предполагаем, что в зацеплении положение пары нагруженных зубьев является сдвигом от положения той же пары зубьев при ненагруженном состоянии на величину  $\delta$  — сближение зубьев (рис. 5).

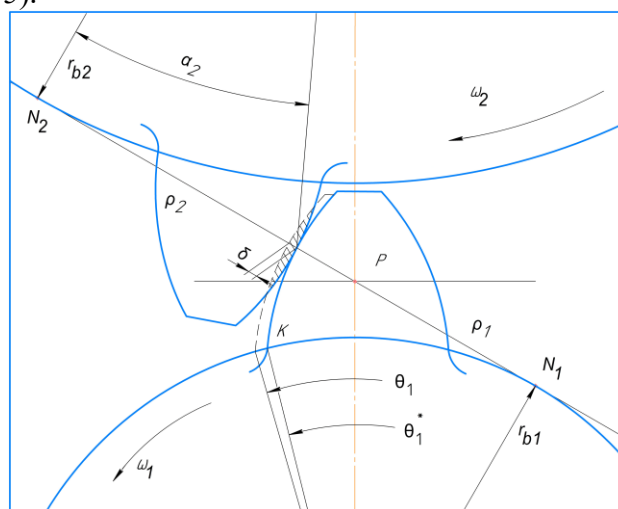


Рис. 5. Сближения поверхностей зубьев

Сближение зубьев можно определить с помощью теории Герца [4]:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 2P \frac{1-\nu^2}{\pi E} \left( \ln \frac{4\rho_1}{a} + \ln \frac{4\rho_2}{a} - 1 \right).$$

По вышесказанной методике, проведены расчеты: ошибки функции положения, ошибки передаточного отношения и коэффициента перекрытия передачи. Результаты расчетов приведены на рис. 6 (зацепления без учета податливости) и рис. 7 (с учетом податливости).

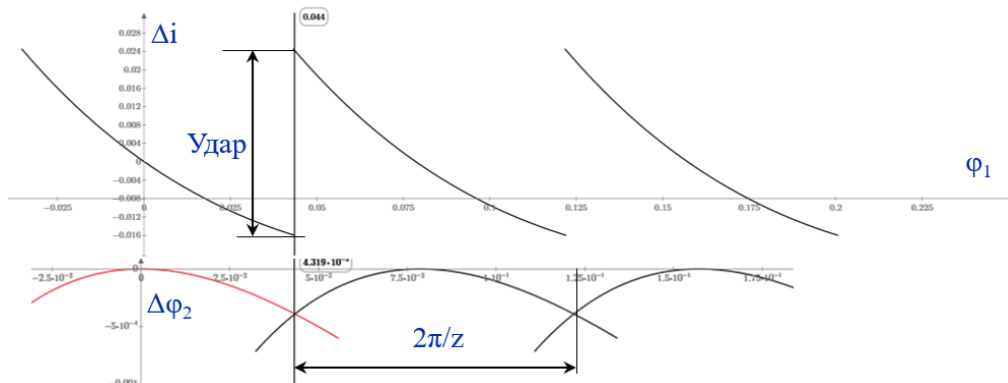


Рис. 6. Кривые ошибки положения и передаточного отношения жесткого зацепления

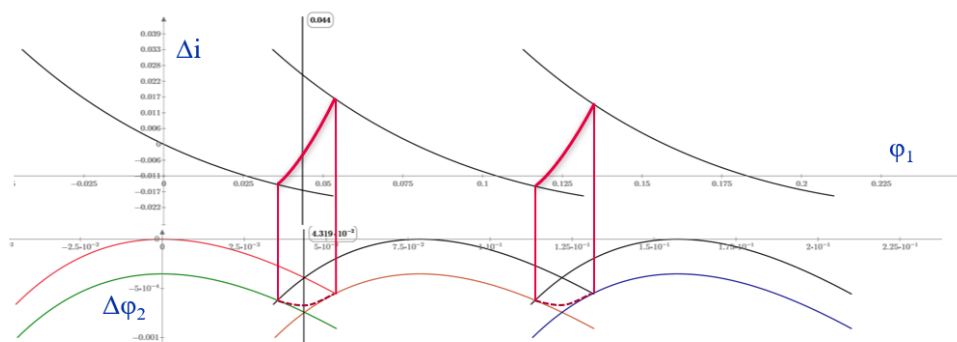


Рис. 7. Кривые ошибки положения и ошибки передаточного отношения деформируемой модели зацепления

В графике для зацепления без учета податливости, скорости зубьев в момент пересопределения меняется скачком, что сопровождается жестким ударом (рис. 6). Как следует из графиков деформируемой модели зацепления, крошечный контакт исключен в результате модификации поверхностей зубьев (рис. 7).

Результаты расчета коэффициента перекрытия передачи сведены в табл. 1 и 2. Изменение коэффициента перекрытия для модифицированных колес при варьировании:

- передаточного отношения ( $m=2 \text{ мм}=\text{const}$ )
- модуля ( $i_{12}=2=\text{const}$ ).

Таблица 1. Варьирование передаточного отношения

Изменение передаточного числа $i$ (при $z_1=17$ )					
Круговая модификация					
Число зубьев $z_2$	21	35	53	71	97
Коэффициент перекрытия $\varepsilon$	1,034	1,044	1,052	1,058	1,065
Параболическая модификация					
Число зубьев $z_2$	21	35	53	71	97
Коэффициент перекрытия $\varepsilon$	1,081	1,090	1,097	1,101	1,106



Таблица 2. Варьирование модуля

Изменение модуля $m$					
Круговая модификация					
Модуль $m$ , мм	2	3	5	8	10
Коэффициент перекрытия $\varepsilon$	1,043	1,041	1,034	1,027	1,023
Параболическая модификация					
Модуль $m$ , мм	2	3	5	8	10
Коэффициент перекрытия $\varepsilon$	1,090	1,0449	1,039	1,025	1,021

Далее представлено сравнение коэффициентов перекрытия при параболической и круговой модификации (рис. 8, а).

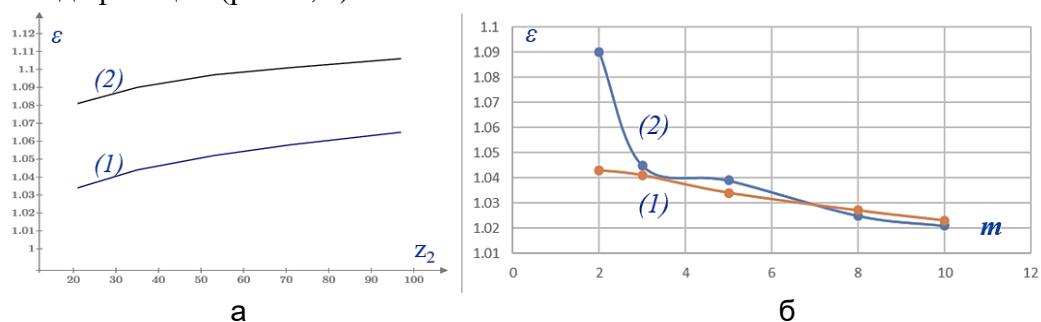


Рис. 8. График сравнения коэффициента перекрытия для круговой (1) и параболической (2) модификации при изменении передаточного отношения (а) и модуля зубьев (б)

Показано, что коэффициент перекрытия возрастает при увеличении передаточного отношения при одинаковых геометрических параметрах и нагружении. При этом коэффициент перекрытия для параболической (2) оказался больше, чем при круговой (1) модификации.

По результатам табл. 2 построен график (рис. 8, б).

Из графиков получено, что коэффициент перекрытия уменьшается при увеличении модулей зубьев при одинаковых геометрических параметрах и нагружения. Во всех вариантах рассмотренных зацеплений коэффициент перекрытия возрастает с увеличением передаточного отношения и уменьшением модуля зубьев.

Исходя из полученных результатов исследования, можно сделать вывод, что учет контактной деформации зубьев повышает коэффициент перекрытия зацепления. Значения коэффициента перекрытия были определены для стальных колес в определенных параметрах передачи. При сравнении круговой и параболической модификации выявлены преимущества параболической модификации, в смысле повышения коэффициента перекрытия и увеличения зоны двухпарного зацепления. Также стоит отметить, что применение передач с локализованным пятном контакта позволяет исключить кромочные контакты, и устранить удары при пересопряжении.

## Литература

1. Антонюк В.Е. и др. Зубчатые передачи. Нормативно-методическое обеспечение точности зубчатых передач на этапе проектирования. – Минск: Беларуская навука, 2016. – 251 с.
2. Тимофеев Б.П. Погрешности высших кинематических пар при их совместной работе // Материалы международной научной школы «Теоретические и прикладные проблемы точности и качества машин, приборов, систем». – 1996. – № 6. – С. 47–52.
3. Подригало Н.М. Оценка влияния точности изготовления зубчатой пары на ее передаточное отношение // Вестник Харьковського національного автомобільно-дорожного університету. – 2013. – № 61-62. – С. 205–209.
4. Hertz Н. Miscellaneous papers by Heinrich Hertz 1857–1894 with an introd. – Macmillan, London: Philipp Lenard authorized. English translation by D.E. Jones, 1896. – 384 p.



**Зенкин Артемий Михайлович**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3435

Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: a.zenkin@corp.ifmo.ru



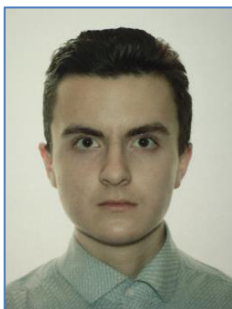
**Осинкин Егор Александрович**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3435

Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: egoros97@yandex.ru



**Пачковский Константин Андреевич**

Год рождения: 1967

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3442

Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: k.pachkouski@corp.ifmo.ru

**УДК 004.932**

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРАНИЦ ПОЖАРА ПО КАМЕРЕ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ  
МОЩНОСТЯХ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

**Зенкин А.М., Осинкин Е.А., Пачковский К.А.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Капитонов А.А.**

Рассмотрена задача автономного обнаружения и отслеживания пожаров с помощью беспилотного летательного аппарата. Предложен алгоритм распознавания огня и определения его позиции с помощью монокулярной камеры. Произведена оценка эффективности системы в симуляторе.

**Ключевые слова:** техническое зрение, система оповещения, распознавание огня, мультикоптер, беспилотный летательный аппарат.

На сегодняшний день в задаче отслеживания и обнаружения лесных пожаров используется авиатрулирование, наблюдение со спутников и наземных наблюдательных пунктов. Однако данные методы являются затратными как в плане человеческих, так и финансовых ресурсов. Автономное авиатрулирование значительно упрощает задачу, поскольку может осуществляться практически круглосуточно и избавляет человека от необходимости наблюдать за обстановкой. Также данное решение позволит выявлять возгорания на раннем этапе, и как следствие, позволяет ускорить тушение пожаров.

В целях отладки алгоритма распознавания и определения позиции огня был использован симулятор Gazebo, где был смоделирован лесной массив размерами 600×600 м, квадрокоптер и монокулярная камера, которая была закреплена под центром масс беспилотного летательного аппарата (БПЛА) и направлена вертикально вниз. В симуляции были учтены внутренние и внешние параметры камеры: разрешение, угол обзора, вес,

тангенциальные и радиальные дисторсии. В целях получения изображения с камеры и передачи информации о местоположении возгорания используется фреймворк под названием «Robotic Operating System».

Детектирование очагов возгорания производится с помощью алгоритма голосования – «правило большинства» или по-другому – «majority voting», использующего за свою основу несколько условий распознавания пикселя огня на изображении [1]. В целях настройки алгоритма были использованы 300 изображений лесных пожаров. Условия распознавания пикселя огня в общем виде определяются следующим образом:

$$y_i(x) = f_i(x) - p_i,$$

где  $y_i(x)$  –  $i$ -ое условие;  $x$  – координата на изображении;  $p_i$  – пороговое значение (константа).

Алгоритм из работы [2] был использован в качестве первого условия и заключается в построении пространственной гистограммы в цветовом пространстве RGB на основе цветности огня. В результате получается функция  $f(r, g, b)$ , зависящая от составляющих красного, зеленого и синего цветов. Данная функция принимает положительные значения в точках, принадлежащих огню, и отрицательные – в точках, принадлежащих фону. Таким образом, первое условие может быть представлено следующим образом:

$$y_1(x) = f[I(x)],$$

где  $I(x)$  – цвет изображения в точке  $x$ .

Второе условие [3] использует цветовое пространство  $L * a * b$ , а именно каналы  $a * i$  и  $b *$ , и представляет собой функцию:

$$y_2(x) = I_{a^*}(x) + I_{b^*}(x) - p_1,$$

где  $p_2 = 32$  – константа, которая была найдена опытным путем;  $I_{a^*}(x)$  и  $I_{b^*}(x)$  интенсивности каналов  $a *$  и  $b *$  в точке  $x$ .

Третье условие основано на том факте, что огонь имеет красноватый оттенок, т.е. в цветовом пространстве RGB интенсивность красного цвета должна быть значительно больше, чем интенсивность зеленого или синего цветов:

$$y_3(x) = I_R(x) + \min[I_R(x), I_G(x), I_B(x)] - p_2,$$

где  $p_2 = 72$  – константа, которая была найдена опытным путем.

Два следующих условия основаны на цветовых пространствах YUV и RGB [4]. За счет четвертого условия производится поиск участков на изображении с высокой интенсивностью:

$$y_4(x) = I_v(x) - p_3,$$

где  $I_v(x)$  – интенсивность канала  $V$ , цветового пространства YUV в точке  $x$  на изображении;  $p_3$  – пороговая константа, которая находится при помощи алгоритма Otsu. Далее найденные участки на изображении анализируются в цветовом пространстве RGB посредством построения пространственной гауссовой модели на основе цветности огня с помощью изображений из датасета.

Таким образом, пятое условие принимает следующий вид:

$$y_5 = -\sqrt{\sum_{C \in \{R, G, B\}} (I_C(x) - m_C)^2} + p_\sigma * \sigma,$$

где  $m_C$  – среднее значение пикселей по каналу  $C$ , удовлетворяющих условию  $y_4$ ;  $\sigma = \max_{\{R, G, B\}}(\sigma_C)$  – стандартное отклонение пикселей по каналу  $C$ , удовлетворяющих условию  $y_4$ ;  $p_\sigma = 2,5$  – пороговая константа, найденная опытным путем.

После обработки изображения с помощью вышеперечисленных условий детектирования пикселя огня, выполняется алгоритм голосования. Его суть заключается в том, что если определенное количество условий выполнилось, то можно считать, что определенный пиксель принадлежит огню. В данном случае, если срабатывают хотя бы четыре условия из пяти, то пиксель считается принадлежащим огню, если нет – то фону.

Далее происходит морфологическая обработка сегментированной части изображения для удаления шумов и слияния сегментированных пикселей.

Работа предлагаемого алгоритма распознавания пожара на изображении была протестирована на видео лесных пожаров и в симуляции. Результат работы алгоритма представлен на рисунке. Частота распознаваний составила 96%. Время выполнения алгоритма на микроконтроллере БПЛА не превысило 1/30 с. На следующем этапе работы планируется разработка алгоритма составления карты возгораний в лесу, а также исследование движения формации мультикоптеров в задаче автономного авиапатрулирования.

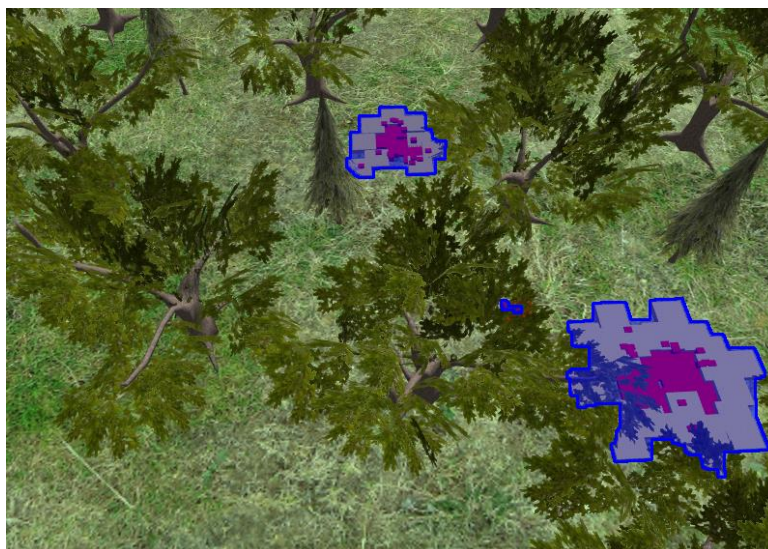


Рисунок. Результат работы алгоритма детектирования границ пожара в симуляции

### Литература

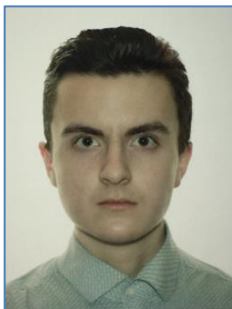
1. Toulouse T. et al. Automatic fire pixel detection using image processing: a comparative analysis of rule-based and machine learning-based methods // *Signal, Image and Video Processing*. – 2016. – V. 10. – № 4. – P. 647–654.
2. Phillips W., Shah M., Da Vitoria Lobo N. Flame recognition in video // *Pattern Recognition Letters*. – 2002. – V. 23. – № 1-3. – P. 319–327.
3. Rossi L., Akhloufi M. Dynamic fire 3D modeling using a real-time stereovision system // *Technological Developments in Education and Automation*. Springer. – 2010. – P. 33–38.
4. Celik T., Hasan D. Fire detection in video sequences using a generic color model // *Fire Safety Journal*. – 2009. – V. 44. – № 2. – P. 147–158.

**Зенкин Артемий Михайлович**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3435Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

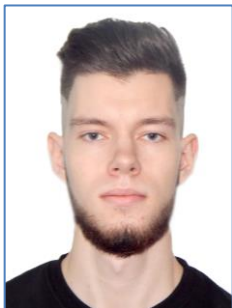
e-mail: a.zenkin@corp.ifmo.ru

**Пачковский Константин Андреевич**

Год рождения: 1967

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3442Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: k.pachkovski@corp.ifmo.ru

**Осинкин Егор Александрович**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3435Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: egoros97@yandex.ru

УДК 623.746-519

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАДРОКОПТЕРА IRIS В СИМУЛЯТОРЕ GAZEBO  
С ДАЛЬНЕЙШИМ СИНТЕЗОМ PID РЕГУЛЯТОРА ПО ВЫСОТЕ****Зенкин А.М., Пачковский К.А., Осинкин Е.А.****Научный руководитель – к.т.н. Капитонов А.А.**

В работе рассмотрена модель динамики полета квадрокоптера с шестью степенями свободы, которая была интегрирована в симулятор Gazebo под управлением ROS (Robot Operating System). ROS – это открытый фреймворк для создания распределенных робототехнических систем, который содержит набор программных библиотек и инструментов, включающих реализацию современных алгоритмов управления и навигации, а также драйвера для робототехнических устройств. К данной модели квадротора была добавлена модель монокулярной камеры. Впоследствии был реализован простейший пропорциональный регулятор по высоте.

**Ключевые слова:** ROS, MAVROS, математическая модель, квадротор, Gazebo, симулятор.

Квадрокоптер – это беспилотный летательный аппарат (БПЛА), который имеет два набора идентичных винтов, которые, в свою очередь, приводятся в движение от четырех бесколлекторных (бесщеточных) моторов для обеспечения необходимой силы тяги и выполнения маневров на протяжении всего полета. Из-за своей легкой конфигурации квадротор один из самых маневренных БПЛА. Что еще более важно, квадрокоптеры имеют возможности для выполнения самолета вертикального взлета и посадки (СВВП) и зависания во время полета. Наряду с беспрецедентной простотой механической конструкции, исключая сложность управления винтами, мультироторные БПЛА становятся уникальными в классе беспилотных систем. Уникальные летные характеристики квадроторов в сочетании с дешевой ценой оборудования увеличили ряд их применений как в

военном, так и в коммерческом секторах. Действительно, интернет-гигант Amazon [1] увидел потенциал ускорения выполнения заказов на поставку и восполнения нехватки рабочей силы за счет использования квадрокоптеров для автономного полета и доставки своим клиентам. Квадроторы также могут быть оснащены камерами с высоким разрешением, чтобы обеспечить относительно дешевые средства для заядлых фотографов и кинематографистов. В военных приложениях дрон является популярной платформой для проведения миссий ISR (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance), особенно в городском АО (Area of Operations), где квадроторы могут быть запрограммированы на полет в зданиях для выполнения визуального отображения и выявления потенциальных угроз.

Iris+, представленный на рис. 1 – это квадрокоптер, который был разработан и построен компанией 3DR (3D Robotics) для энтузиастов и любителей воздушных RC-моделей, и может быть оснащен камерой для выполнения аэрофотосъемки. На борту установлен LiPo (lithium-ion polymer battery) – 12 В и 5100 А·ч, которая в сочетании с четырьмя бесколлекторными двигателями обеспечивает до 22 мин полета дрона. Двигатели создают силу тяги, которой достаточно, чтобы поднять непосредственно сам БПЛА в воздух и нести до четырехсот граммов полезной нагрузки. Iris+ также оснащен телеметрией, которая позволяет осуществлять связь с наземной станцией по беспроводной сети, поставляя полетные данные в режиме реального времени на компьютер, тем самым обеспечивая возможность летать автономно.

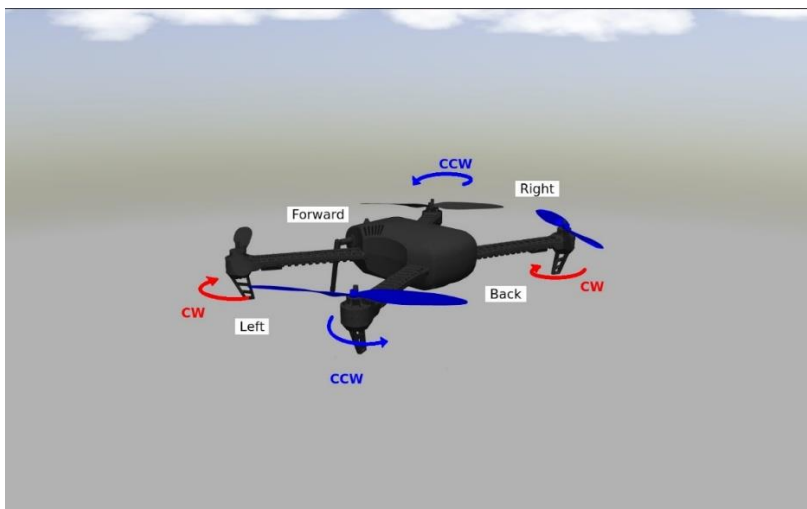


Рис. 1. Модель квадрокоптера IRIS+ в симуляторе Gazebo

Для построения математической модели квадрокоптера важно сначала определить систему координат (СК) для описания поступательного и вращательного движения квадротора. Используемые в математической модели системы координат, а также силы, действующие на нее, показаны на рис. 2:

- инерциальная СК  $\{i\}$  (inertial frame). Траектория полета БПЛА, которая определяется посредством ГЛОНАС, рассчитывается относительно инерциальной СК;
- СК  $\{b\}$ , жестко связанная с корпусом квадрокоптера (fixed-body frame). Центром данной СК является центр тяжести квадрокоптера. Данная СК вращается вместе с квадротором.

Преобразование углового движения квадрокоптера из СК  $\{b\}$  в инерционную СК  $\{i\}$  может быть описано матрицей вращения, которая также известна как DCM (Direction Cosine Matrix). DCM представляет собой комбинацию последовательности вращений, в которой квадротор сначала вращается вдоль оси  $Z$  (т.е. рыскание), затем вращение вдоль оси  $Y$  (т.е. тангаж) и, наконец, вращение вдоль оси  $X$  (т.е. крен). Матрицы вращения для рыскания, тангажа и крена умножаются для получения уравнения:

$$R_i^b = \begin{pmatrix} c\theta \cdot c\psi & c\psi \cdot c\theta & -s\theta \\ c\psi \cdot s\theta \cdot s\varphi - s\psi \cdot c\varphi & s\psi \cdot s\theta \cdot s\varphi + c\psi \cdot c\varphi & c\theta \cdot s\varphi \\ c\psi \cdot s\theta \cdot c\varphi + s\psi \cdot s\varphi & s\psi \cdot s\theta \cdot c\varphi - c\psi \cdot s\varphi & c\theta \cdot c\varphi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $c$  и  $s$  – соответственно  $\cos$  и  $\sin$  определенного угла

$$P^b = R_i^b \cdot P^i, \quad (2)$$

$$R_b^i = R_i^{bT} = \begin{pmatrix} c\theta \cdot c\psi & c\psi \cdot s\theta \cdot s\varphi - s\psi \cdot c\varphi & c\psi \cdot s\theta \cdot s\varphi + s\psi \cdot s\varphi \\ c\psi \cdot c\theta & s\psi \cdot s\theta \cdot s\varphi + c\psi \cdot c\varphi & s\psi \cdot s\theta \cdot s\varphi - c\psi \cdot c\varphi \\ -s\theta & c\theta \cdot s\varphi & c\theta \cdot c\varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

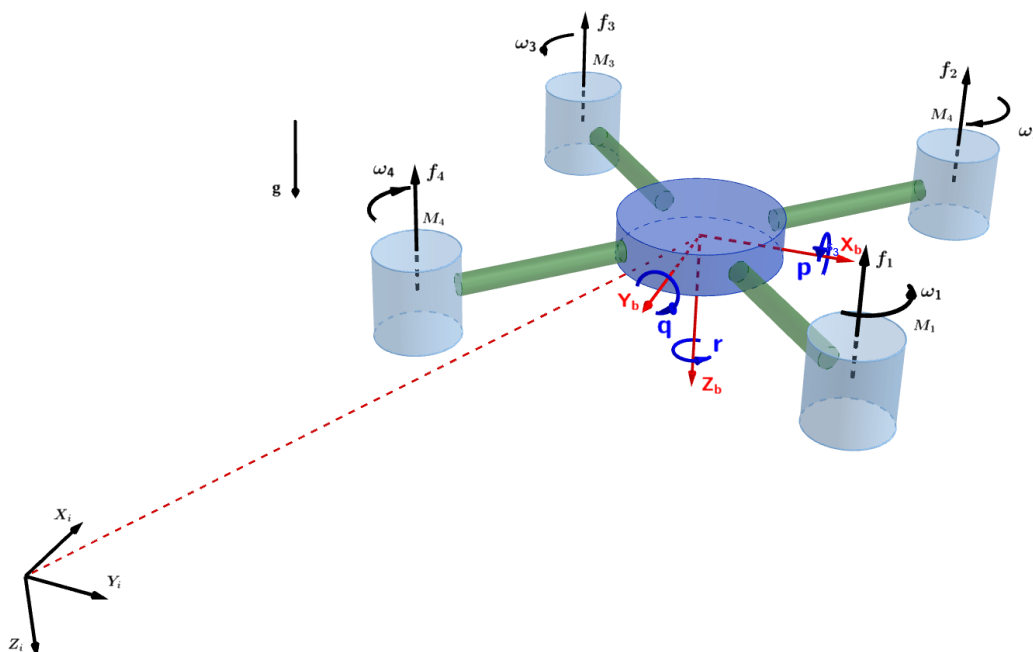


Рис. 2. Расположение СК в математической модели

Уравнение движения квадрокоптера IRIS+:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p + q \cdot s\varphi \cdot \tan\theta + r \cdot c\varphi \cdot \tan\theta \\ q \cdot c\varphi - r \cdot s\varphi \\ q \cdot s\varphi - \sec\theta + r \cdot c\varphi \cdot \sec\theta \\ v \cdot r - q \cdot w - g \cdot s\varphi \\ p \cdot w - u \cdot r + g \cdot c\theta \cdot s\varphi \\ u \cdot q - p \cdot v + g \cdot c\theta \cdot c\varphi \\ q \cdot r \cdot (I_{yy} - I_{zz}) / I_{xx} \\ q \cdot r \cdot (I_{zz} - I_{xx}) / I_{yy} \\ q \cdot r \cdot (I_{xx} - I_{yy}) / I_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_z / m \\ L / I_{xx} \\ M / I_{yy} \\ N / I_{zz} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $u$  – линейная скорость квадрокоптера вдоль оси  $X$  в СК  $\{b\}$ ;  $v$  – линейная скорость квадрокоптера вдоль оси  $Y$  в СК  $\{b\}$ ;  $w$  – линейная скорость квадрокоптера вдоль оси  $Z$  в СК  $\{b\}$ ;  $p$  – ускорение крена квадрокоптера вдоль оси  $X$  в СК  $\{b\}$ ;  $q$  – ускорение тангажа квадрокоптера вдоль оси  $Y$  в СК  $\{b\}$ ;  $r$  – ускорение рыскания квадрокоптера вдоль оси  $Z$  в СК  $\{b\}$ ;  $F_z, L, M, N$  – аэродинамические силы и моменты: суммарная тяга, крутящий момент

крена, тангажа и рыскания соответственно;  $m$  – масса квадрокоптера;  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$  – момент инерции относительно осей квадрокоптера  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  соответственно,  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$ ;  $\varphi$  – угол крена квадрокоптера в СК  $\{i\}$ ;  $\theta$  – угол тангажа квадрокоптера в СК  $\{i\}$ ;  $\psi$  – угол рыскания квадрокоптера в СК  $\{i\}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для точного представления математической модели квадрокоптера необходимо измерить и определить его физические свойства. В качестве измерительного оборудования использовались измерительная лента и весы для определения веса и длины плеч квадрокоптера вдоль осей  $x$  и  $y$  (рис. 3).

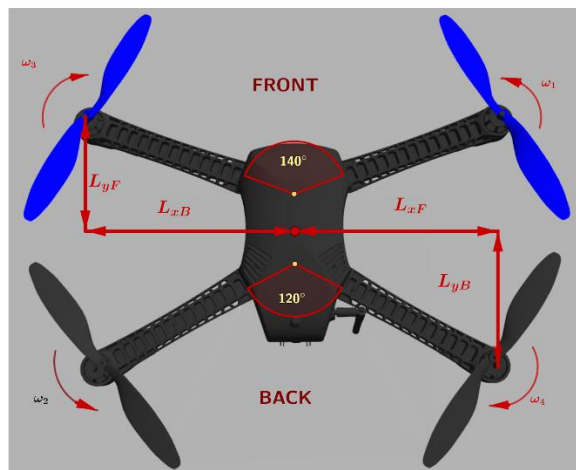


Рис. 3. Иллюстрация плечей моментов IRIS+

Результаты измерений приведены в таблице.

Таблица. Измерение физических характеристик квадрокоптера

Параметр	Значение	Размерность
$m$	1,689	кг
$I_{xx}$	0,0297	кг·м <sup>2</sup>
$I_{yy}$	0,0641	кг·м <sup>2</sup>
$I_{zz}$	0,0691	кг·м <sup>2</sup>
$b$	$7,2115 \cdot 10^{-6}$	кг·м
$d$	$1,6473 \cdot 10^{-7}$	кг·м <sup>2</sup>
$L_{xB}$	0,228	м
$L_{xF}$	0,209	м
$L_{yF}$	0,128	м
$L_{yB}$	0,128	м

Квадротор – это система с неполным приводом. Поэтому, чтобы двигаться вперед в направлении  $x$ , квадрокоптер должен сначала изменить свое положение, наклонившись вниз, чтобы создать горизонтальную силу от толчков пропеллеров, сохраняя при этом свою высоту. Точно также, чтобы двигаться в боковом направлении в направлении  $y$ , дрон должен изменить свое положение, наклоняясь вправо или влево, сохраняя свою высоту.

Уравнение управления ориентацией [2, 3] приведены в уравнениях (5) и (6):

$$\varphi_d = K_{1,y} \cdot [R_i^b(y_d - y) - K_{2,y} \cdot \dot{y}_V], \quad (5)$$

$$\theta_d = K_{1,x} \cdot [R_i^b(x_d - x) - K_{2,x} \cdot \dot{x}_V], \quad (6)$$



где  $R_i^b$  – матрица вращения, преобразующая положение квадрокоптера от  $\{i\}$  СК в  $\{b\}$  СК;  $K_{1,x}$  – пропорциональный коэффициент усиления для позиции в направлении оси  $X$ ;  $K_{2,x}$  – производный коэффициент усиления для скорости в направлении оси  $X$ ;  $K_{1,y}$  – пропорциональный коэффициент усиления для позиции в направлении оси  $Y$ ;  $K_{2,y}$  – производный коэффициент усиления для скорости в направлении оси  $Y$ .

Уравнения управления силами и моментами:

$$\tau_\theta = K_{P,roll} \cdot (\varphi_d - \varphi_m) + K_{I,roll} \cdot (\varphi_d - \varphi_m) + K_{D,roll} \cdot (\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}_m), \quad (7)$$

$$\tau_\theta = K_{P,pitch} \cdot (\theta_d - \theta_m) + K_{I,pitch} \cdot (\theta_d - \theta_m) + K_{D,pitch} \cdot (\dot{\theta}_d - \dot{\theta}_m), \quad (8)$$

$$\tau_\psi = K_{P,yaw} \cdot (\psi_d - \psi_m) + K_{I,yaw} \cdot (\psi_d - \psi_m) + K_{D,yaw} \cdot (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}_m), \quad (9)$$

$$T = K_{P,z} (z_d - z) + K_{I,z} (z_d - z) + K_{D,z} (\dot{z}_d - \dot{z}) + \omega_0, \quad (10)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{m \cdot g}{4 \cdot K_T}}, \quad (11)$$

где  $K_{P/I/D,roll/pitch/yaw}$  – пропорциональный/интегральный/дифференциальный коэффициент усиления для углов крена, тангажа и рыскания соответственно;  $K_{P/I/D,z}$  – пропорциональный/интегральный/дифференциальный коэффициент усиления для положения вдоль оси  $Z$ ;  $\omega_0$  – скорость вращения двигателя, необходимая для создания тяги, равной весу квадрокоптера [4–6].

Результатом данной работы стало моделирование квадрокоптера IRIS+ в симуляторе Gazebo под управлением ROS на языке программирования C++. В дальнейшем планируется реализовывать систему управления на реальном квадрокоптере, опираясь на математическую модель, описанную выше.

## Литература

1. Fum W.Z. Implementation of simulink controller design on iris+ quadrotor. Master's thesis. – Naval Postgraduate School, 2015. – 103 p.
2. Beard W.R. Quadrotor dynamics and control [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rwbclasses.groups.et.byu.net/lib/exe/fetch.php?media=quadrotor:beardsquadrotornotes.pdf>, своб.
3. 3DR product, Pixhawk autopilot. (n.d.). 3D Robotics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://store.3drobotics.com/products/3dr-pixhawk>, своб.
4. Freddi A., Lanzon A., Longhi S. A Feedback Linearization Approach to Fault Tolerance in Quadrotor Vehicles // IFAC Proceedings. – 2011. – V. 44. – № 1. – P. 5413–5418.
5. Amazon Prime air. (n.d.). Amazon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>, своб.
6. Bouabdallah S. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=29344AD29C9E8AB64048C1C7193A6064?doi=10.1.1.89.5556&rep=rep1&type=pdf>, своб.



**Зименко Ксения Владимировна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41771

Направление подготовки: 12.04.01 – Системы и технологии цифрового  
производства

e-mail: zksenia@yahoo.com



**Афанасьев Максим Яковлевич**

Год рождения: 1986

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники  
к.т.н., доцент

e-mail: myafanasyev@corp.ifmo.ru

**УДК 67.05**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ  
И ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА  
УСТАНОВКИ СЕЛЕКТИВНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ ФОТОПОЛИМЕРОВ**

**Зименко К.В.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Афанасьев М.Я.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Приведено описание разрабатываемого алгоритма планирования траектории исполнительного устройства, включающего в себя интерполяцию и построение профиля скорости инструмента. Упомянуты актуальность и практическая ценность работы, а также план дальнейшей разработки.

**Ключевые слова:** числовое программное управление, алгоритм, лазерная обработка, контроль разгона/торможения, интерполяция, управляющая программа.

Большинство изготавливаемых продуктов сегодня имеют тенденцию к усложнению, уменьшению геометрических размеров и внедрению компьютерной составляющей. При этом надежность работы изделий во многом зависит от качества изготовления и сопряжения составляющих их деталей [1]. Очевидно, что задача повышения качества и точности изготовления деталей играет важную роль в приборостроении.

Повышения точности обработки материала можно добиться высококачественными материалами и инструментами. Однако наиболее эффективным способом влияния на точность полученных изделий является способность установок с числовым программным управлением (ЧПУ) достигать высокой производительности и точности обработки. Повысить эффективность ЧПУ станков возможно как с помощью аппаратных, так и программных средств.

Задачей данного исследования являлась разработка модификации алгоритмов программного обеспечения, позволяющей добиться высокоточной обработки на высоких скоростях. Установка с ЧПУ управляется управляющими программами: инструкциями, написанными на языке G-кодов. Управляющая программа в станке проходит через несколько последовательных этапов анализа, включающих в себя:

1. интерпретатор извлекает данные путем анализа управляющей программы;
2. интерполяция. На данном этапе строится траектория инструмента;
3. контроль разгона/торможения формирует профиль скорости инструмента;
4. позиционный контроль осуществляет проверку и исправление возможных ошибок.

Наибольшее влияние на точность оказывают этапы интерполяции и контроля разгона/торможения [2]. При интерполяции последовательно рассчитываются перемещения, которые должен пройти инструмент при разгоне, торможении и постоянной скорости за каждый интервал времени. Таким образом, на данном этапе формируется путь инструмента по ходу обработки заготовки, и от степени совпадения заданной в управляющей программе и результирующей траекторий зависит качество полученного изделия.

Алгоритмы контроля разгона/торможения на основе данных, полученных из интерпретатора, генерируют скорости исполнительного устройства на каждом интервале времени интерполяции. Данный этап оказывает влияние на характер движения инструмента: при резких перепадах скорости возникает вибрация, приводящая к ухудшению качества полученной после обработки поверхности. Исходя из этого, необходимы эффективные алгоритмы контроля скорости инструмента для совершенствования обработки на станках, оснащенных ЧПУ [3].

Так как современные станки с ЧПУ на рынке отвечают высоким требованиям точности и качества обработки, данные вопросы уже были решены производителями коммерческих установок, однако данное программное обеспечение представляет собой проприетарный код, недоступный стороннему разработчику.

С учетом вышесказанного, задачей настоящей работы являлась разработка открытой реализации эффективных алгоритмов интерполяции и формирования профиля скорости инструмента. Предполагалось применение программной библиотеки на разрабатываемой в рамках работы установке селективного отверждения фотополимеров для изготовления печатных плат высокого качества в рамках единичного производства.

Исполнительным устройством упомянутой выше установки селективного отверждения фотополимеров является лазерная головка. Качество лазерной обработки находится в строгой обратной зависимости от вибраций головки. Также лазерная обработка чаще всего происходит на больших скоростях исполнительного устройства. Таким образом, необходим алгоритм контроля разгона/торможения, эффективный при высоких значениях подачи и минимальной вибрации инструмента.

**Контроль разгона/торможения.** Разработана программная библиотека, обеспечивающая расчет скоростей инструмента на основе косинусоидальной функции [4]. Она позволяет избежать резких перепадов скорости и, таким образом, снизить уровень вибрации и толчков при движении. Также для реализации применен метод упреждающего просмотра, суть которого заключается в подсчете скорости инструмента с учетом не только текущего, но и последующих блоков управляющей программы. В результате на границах участков при применении алгоритма упреждающего просмотра отсутствуют резкие перепады скорости и ликвидируются излишние торможения до нулевой скорости. Сокращается время обработки, и инструмент движется с минимальной вибрацией [3].

Еще одной задачей является подсчет скорости на углах траектории. Очевидно, что получить точный угол без изменения заданной траектории инструмента можно только путем полной остановки в угле. Это приводит к снижению качеству поверхности изделия, так как на него влияют вибрации при разгоне/торможении. Также на обработку будет уходить больше времени. С другой стороны, при задании скруглений, движение без замедления по отношению к линейному участку блока может привести к превышению допустимого ускорения в момент прохождения скругления и в конечном итоге к поломке оборудования [3]. Следовательно, необходимо снизить скорость так, чтобы допустимая величина ускорения не была превышена. Эта задача реализована путем сравнения разницы в скоростях на соседних участках и максимального ускорения. Если допустимое ускорение превышено, то производится корректировка подачи на угле.

В результате при обработке траекторий, состоящих из нескольких сегментов, результирующий профиль выглядит следующим образом (рис. 1).

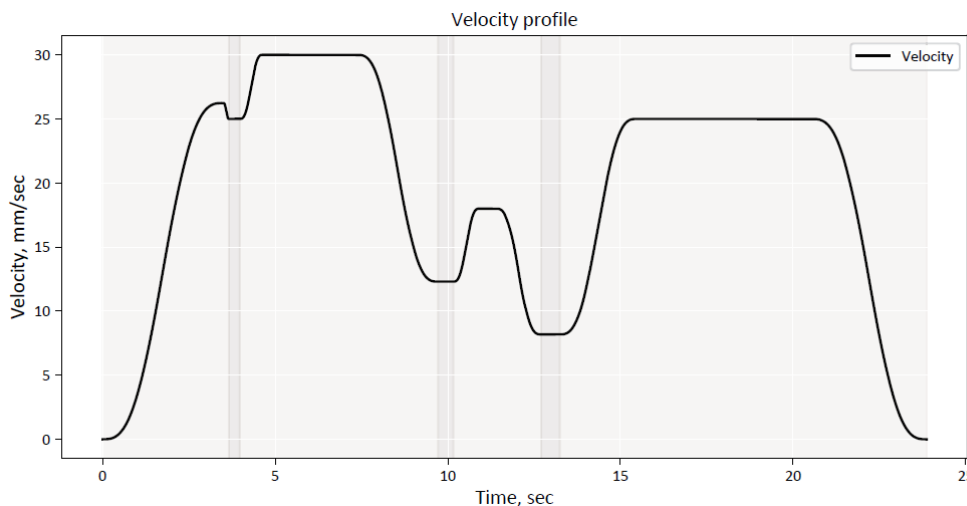


Рис. 1. Сформированный по разработанному алгоритму профиль скорости

**Интерполятор.** Интерполятор играет роль генератора осевого движения инструмента на основе данных, полученных из интерпретатора кода управляющей программы. Данный этап является одним из главных компонентов ЧПУ. По стандарту имеются два основных вида пути инструмента: прямолинейное и круговое движение. Однако в современных системах с ЧПУ все чаще используются сложные траектории: эвольвенты, спирали и т.д.

Для успешного выполнения интерполяции необходимо разделить движение инструмента на компоненты, соответствующие каждой оси. Траектория исполнительного устройства формируется из индивидуальных перемещений по каждой оси. В настоящей работе рассмотрены существующие виды интерполяторов, упомянуты их достоинства и недостатки и определен оптимальный алгоритм интерполяции для применения при лазерной обработке.

Интерполяторы можно разделить на две главные группы: опорно-импульсные и интерполяторы выборочных данных. Опорно-импульсные методы основаны на вычислении единичных смещений инструмента путем генерации импульсов как внешних прерывающих сигналов, и далее эти импульсы отправляются к машинному приводу. Главным достоинством метода является высокая точность обработки. Однако данный алгоритм невозможно использовать при высокой скорости обработки.

Идея алгоритма выборочных данных заключается в разбиении пути на интерполяционные периоды  $T_{ipr}$ ; для них рассчитывается расстояние, которое необходимо пройти инструменту за это время с учетом скорости на данном участке. Далее рассчитывается перемещение, которое должен совершить инструмент по каждой оси. Интерполяторы выборочных данных широко используются в современных системах ЧПУ в силу их эффективности при высокоскоростной обработке. Но при этом увеличивается расхождение между заданной и результирующей траекториями, что приводит к большей ошибке обработки, чем при опорно-импульсных алгоритмах. Решение данной проблемы предполагает применение сложных расчетов и арифметики с плавающей запятой.

Как уже было упомянуто выше, помимо линейных участков и дуг окружностей все чаще используются сложные функции, такие как сплайны, эвольвенты и спирали. Теоретически любые формы можно аппроксимировать линейными сегментами. Однако при традиционном подходе сложная траектория аппроксимируется линейными сегментами, которые, в свою очередь, разбиваются на еще более мелкие участки [2]. Это приводит к большой ошибке обработки. Чтобы снизить расхождение траекторий, первичные сегменты должны быть малы и максимально приближены к кривой, что приводит к росту числа итераций.

Чтобы преодолеть этот недостаток, были разработаны методы интерполяции на основе параметрических кривых, где система напрямую из управляющей программы строит кривую,

разбитую на малые сегменты. Наиболее известным методом данной группы является NURBS, однако, широко применяются алгоритмы на основе других типов параметрических кривых.

Возможность сократить неточность обработки сложной траектории является преимуществом данного метода [5]. Однако использование его для анализа линейных траекторий приводит к излишним громоздким расчетам, а значит, нецелесообразно для простой линейной интерполяции.

С учетом вышесказанного, целесообразно совмещение нескольких методов формирования траектории. Для обхода сложных форм выбран метод NURBS, позволяющий получить высокую точность обработки, плавный профиль скорости инструмента и, как результат, высокое качество поверхности. Однако для линейных участков будет применен метод выборочных данных в силу его эффективности при высокоскоростной обработке. В рамках разработки алгоритма интерполяции была разработана методика сглаживания углов на основе параметрических кривых, позволяющая сглаживать углы траектории. Для возможности управления величиной ошибки обработки построение осуществляется по 6 контрольным точкам (рис. 2), в результате возможно управление и размером, и формой скругления. При этом расчет прилегающих к скруглению линейных участков производится традиционным методом выборочных данных.

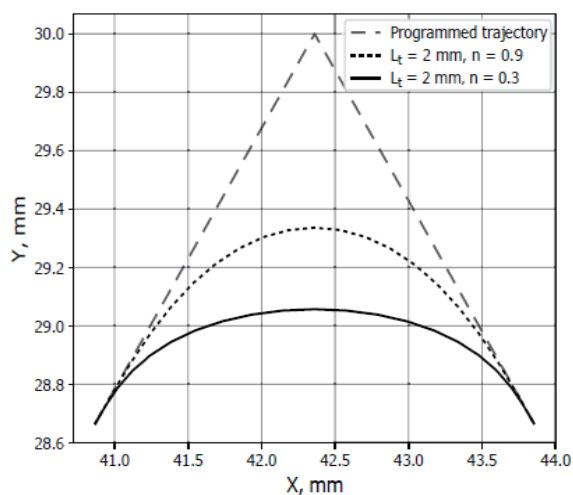


Рис. 2. Построение скругления на основе параметрической кривой

Таким образом, были определены этапы анализа управляющей программы, которые в наибольшей степени влияют на точность обработки: контроль разгона/торможения и интерполяция. Приведено краткое описание разработанного алгоритма создания профиля скорости, определены оптимальные методы интерполяторов для применения при лазерной обработке.

## Литература

1. Smid P. CNC programming handbook: comprehensive guide to practical CNC programming. – Industrial Press Inc.: New-York, 2003. – 455 p.
2. Suk-Hwan Suh, Seong-Kyoon Kang, Dae-Hyuk Chung, Ian Stroud. Theory and Design of CNC Systems. – Springer, London: Springer Series in Advanced Manufacturing, 2008. – 508 p.
3. Зименко К.В. Оптимизация траектории движения исполнительного устройства оборудования с ЧПУ: дипломная работа. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 74 с.
4. Lin Wang, Jianfu Cao. A look-ahead and adaptive speed control algorithm for high-speed CNC equipment // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – V. 63. – № 5–8. – P. 705–717.
5. Du X., Huang J., Zhu L.-M. A complete S-shape feed rate scheduling approach for NURBS interpolator // J. Comput. Des. Eng. – 2015. – V. 2. – P. 206–217.



**Зименко Ксения Владимировна**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41771

Направление подготовки: 12.04.01 – Системы и технологии цифрового  
производства

e-mail: zksenia@yahoo.com



**Куликов Дмитрий Дмитриевич**

Год рождения: 1940

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники  
д.т.н., профессор

e-mail: ddkulikov@mail.ru

**УДК67.05**

**СИСТЕМА ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕТАЛИ  
С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЗДАНИЕМ ЕЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

**Зименко К.В.**

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Куликов Д.Д.**

Описана разработанная методика параллельного проектирования геометрической и параметрической модели детали/заготовки путем ее синтеза из базовых конструктивных элементов. Приведены практическая ценность в области осуществления совместимости технологических систем и актуальность работы, а также планы дальнейших разработок.

**Ключевые слова:** САПР, технологический процесс, библиотека, геометрическая модель, параметрическая модель, САД-система.

Одной из проблем повышения уровня автоматизации производства является наличие барьера интероперабельности между применяемыми программными продуктами, такими как система автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) и САД-системами. Главным препятствием к их совместимости является формат объекта работы: моделей деталей/заготовок, так как САПР ТП используют параметрическую, а САД-система работает с электронно-геометрической моделью (ЭГМ) [1].

Основная задача настоящей работы состояла в обеспечении интероперабельности между системами САПР ТП и САД-системой. Решение данной проблемы лежит, на взгляд авторов, в совмещении процесса создания 3D-модели и параметрической модели детали/заготовки путем разработки программной библиотеки, осуществляющей их параллельное проектирование в САД-системе [2]. В результате параметрическая модель будет использована в САПР ТП, а электронно-геометрическая – в САД-системе.

Целью настоящей работы являлось создание библиотеки конструктивных элементов (КЭ), состоящей из графических и параметрических шаблонов для создания моделей деталей или заготовок. Для осуществления работы с шаблонами требуется разработка программного модуля.

Очевидно, что модель детали любой сложности может быть сформирована из простых КЭ, таких как конус, цилиндр, паз и т.д. [3]. Эта идея лежит в основе разработанной методики конструирования на базе КЭ. Процесс проектирования детали можно разделить на два основных этапа:

1. создание требуемых для построения детали КЭ на основе разработанной библиотеки шаблонов. При этом необходимо параллельное создание и параметрической, и геометрической модели каждого элемента;
2. путем синтеза из набора КЭ формируется требуемая деталь/заготовка. Для объединения составляющих используется инструментарий модуля сборки CAD-системы.

Разработанный программный модуль позволяет использовать графический и параметрический шаблоны КЭ, и настроить их в соответствии с требуемыми параметрами, такие как размеры, шероховатость, отклонения формы и т.д.

Процесс создания модели детали/заготовки в разработанной системе представлен на рис. 1.

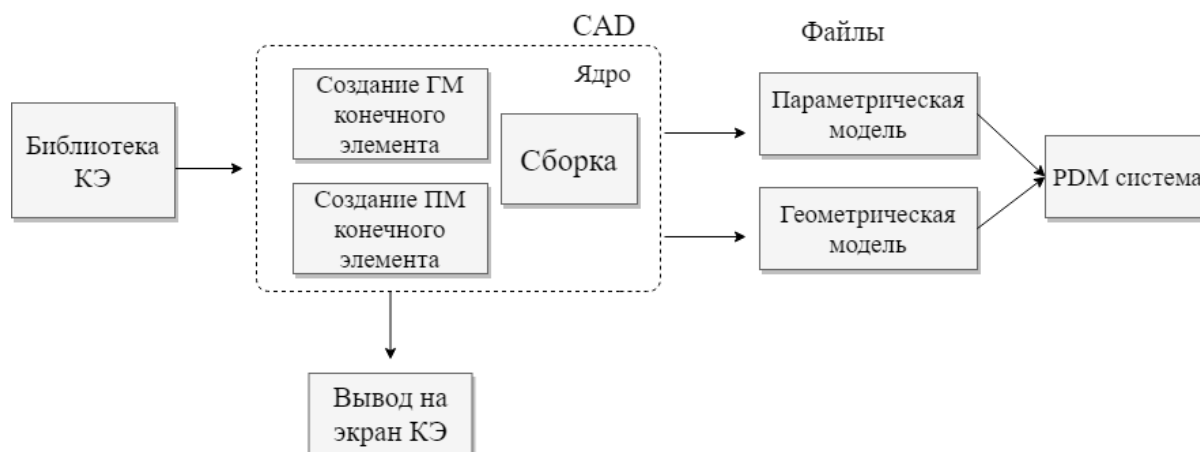


Рис. 1. Структура системы параллельного создания электронно-геометрической и параметрической моделей деталей/заготовок

Процесс начинается с создания геометрических и параметрических моделей КЭ, из которых состоит требуемая деталь/заготовка, на основе имеющихся в библиотеке шаблонов. Разработанная библиотека КЭ состоит из трех частей: эскизов, инструкций для создания геометрических и параметрических моделей элементов.

После создания всех требуемых КЭ модели производится сборка детали из конечных элементов. Результатом работы программы являются файл в формате CATPart и файл XML. В первом содержится электронно-геометрическая модель, которую можно просматривать в CAD-системе, во втором параметрическая модель. В дальнейшем их можно импортировать и осуществлять просмотр в PDM-системе.

Для работы была выбрана CAD-система CATIA V5, в ней происходит формирование геометрической и осуществляется запись данных в файл параметрической модели. Система разработана с использованием языка программирования CATScript, разновидности языка Visual Basic, поддерживаемого CATIA [4, 5].

Создание КЭ детали начинается с определения общих характеристик, необходимых конструктору, которые записываются в файл с параметрической моделью. В них входят данные о материале детали, номер чертежа, фамилия разработчика и т.д. Ввод осуществляется с помощью разработанной формы. Запись полученной информации осуществляется в XML файл. Отрывок из примера записи представлен ниже. Аналогичным образом записываются все требуемые параметры.

```

<name>Наименование объекта</name>
<oboz>Det</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>Вал</vel>
<name>Номер чертежа</name>
<oboz>Nom</oboz>
<otn>=</otn>
  
```

```

<vel>KPC3674-068</vel>
<name>Марка материала</name>
<oboz>Marka</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>Сталь 10</vel>

```

Далее выбирается группа конструктивных элементов и требуемый элемент. К группам КЭ относятся цилиндры, конусы, отверстия и т.д. При выборе того или иного КЭ в файл с параметрической моделью записывается его код и открывается форма для его создания в соответствии с выбранным шаблоном.

Далее в форму, соответствующую выбранному КЭ, вводятся непосредственно параметры конструкционного элемента, включая требуемую точность размеров, шероховатость, отклонения и т.д.

Так, при выборе КЭ «цилиндр открытый», выводится форма для создания элемента, представленная на рис. 2, а. После внесения всех требуемых значений параметров автоматически формируется два файла: электронно-геометрическая модель, содержащаяся в файле формата САТPart, и XML-файл, где хранится параметрическая модель и общие характеристики созданного элемента. Полученная в результате работы ЭГМ элемента показана на рис. 2, б.

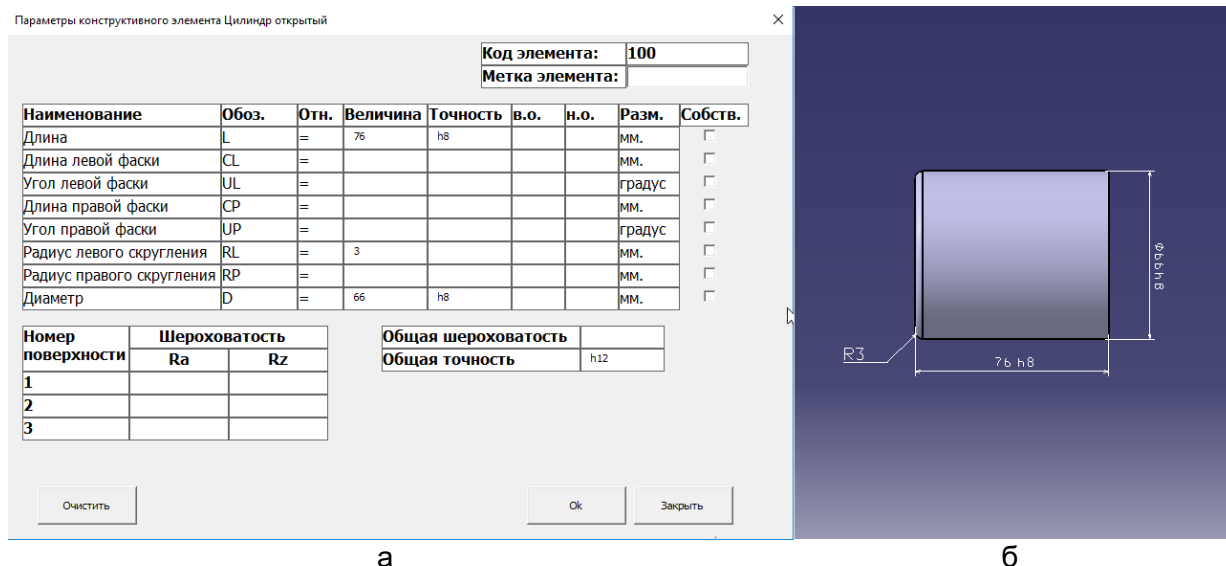


Рис. 2. Форма для создания ЭГМ КЭ «цилиндр открытый» (а); ЭГМ элемента, полученная в результате работы (б)

Ниже представлена часть XML-файла, полученного при проектировании КЭ.

```

<name>Длина</name>
<oboz>L</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>70</vel>
<name>Точность длины</name>
<oboz>AccuracyL</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>h8</vel>
<name>Радиус левого скругления</name>
<oboz>RL</oboz>
<otn>=</otn>
<vel>3</vel>
<name>Общая точность</name>
<oboz>HA</oboz>

```



<otn>=</otn>  
<vel>h12</vel>

При задании конструктивных характеристик КЭ осуществляется контроль ошибок ввода данных. Так, например, проверяется, что все требуемые величины внесены, например, для цилиндра – это параметры длины и диаметра, и что данные внесены верно (т.е. в численном виде и не вызывают несоответствий).

Оба файла в дальнейшем можно импортировать в PDM-систему для дальнейшего просмотра с помощью вьювера для ЭГМ детали/заготовки и с помощью модуля «ТИС-Деталь» просматривать параметрические модели деталей и заготовок.

В результате выполнения работы была создана библиотека шаблонов КЭ, из которых конструируется деталь/заготовка. Разработана система, позволяющая параллельно создавать параметрические и геометрические модели КЭ на основе полученных шаблонов в САД-системе.

В число задач для дальнейшей разработки входит создание программной системы, позволяющей проектировать операционные заготовки (ОЗ). В настоящее время информацию о параметрах ОЗ технолог вручную вводит в модель технологического процесса в существующих САПР ТП. Решение этой задачи позволит существенно повысить уровень автоматизации САПР ТП и тем самым повысить качество проектируемых технологических процессов, а также снизить время и стоимость их проектирования.

## Литература

1. Куликов Д.Д., Шувал-Сергеев Н.А. Проектирование операционных заготовок с использованием САД-системы // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – № 6. – С. 42–46.
2. Куликов Д.Д., Бабанин В.С. Создание параметрической модели детали в среде САД-системы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 4(74). – С. 167–169.
3. Куликов Д.Д., Гусельников В.С., Бабанин В.С., Шувал-Сергеев Н.А. Проектирование операционных заготовок в среде САД-систем. Методическое пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 60 с.
4. Dieter R. Zithen. CATIA V5: Macro Programming with Visual Basic Script [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.accessengineeringlibrary.com/browse/catia-v5-macro-programming-with-visual-basic-script#fullDetails>, своб.
5. Catia macro programming guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scripting4v5.com/additional-articles/>, своб.



**Истомин Владимир Алексеевич**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р4230

Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: vladimir.istomin@mail.ru



**Драницына Елена Викторовна**

Год рождения: 1985

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н.

e-mail: dranitsyna\_ev@mail.ru

УДК 681.7.068

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРИАДЫ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ**

**Истомин В.А.**

**Научный руководитель – к.т.н. Драницына Е.В.**

Работа выполнена в рамках темы НИР «Идентификация и учет модели погрешностей триады волоконно-оптических гироскопов».

Для повышения точности курсоуказания следует учесть всевозможные инструментальные ошибки триады волоконно-оптических гироскопов. В работе рассмотрена актуальность уточнения указания курса за счет уточнения параметров модели погрешностей триады волоконно-оптических гироскопов.

**Ключевые слова:** триада, ВОГ, модель погрешностей, шумовая составляющая, блок гироскопов, блок акселерометров.

**Введение.** В настоящее время широкое распространение получили интегрированные системы ориентации и навигации, в которых навигационное решение формируется по данным глобальной навигационной спутниковой системы, а точность выработки параметров ориентации полностью ложится на инерциальный измерительный модуль. Увеличить точность выработки параметров ориентации, а именно угла курса, при использовании триады относительно недорогих волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) можно путем уточнения их модели погрешностей при регулировании изделия на предприятии-изготовителе и последующем уточнении коэффициентов этих моделей в ходе эксплуатации при использовании автокомпенсационного вращения. В таких системах для обеспечения предельной погрешности определения курса менее  $1^\circ$  ( $3\sigma$ ) необходимо использование дорогостоящих ВОГ среднего класса точности  $0,05-0,1^\circ/\text{ч}$  [1, 2]. Существенно повысить точность систем на ВОГ тактического ( $1-10^\circ/\text{ч}$ ) класса точности позволяет применение принудительного модуляционного вращения [3].

Примером таких систем может послужить изделие Бекар-Э в составе одного центрального прибора ВИИМ-2 (рис. 1). Это малогабаритная система гироскопической стабилизации с автокомпенсационным приводом вращения. Производство: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия [4].

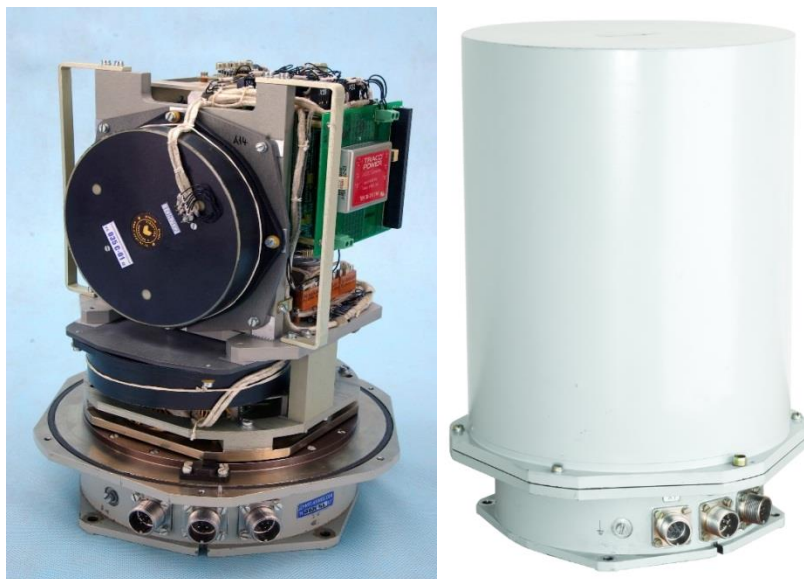


Рис. 1. Прибор ВИИМ-2

**Актуальность, цель работы.** При использовании грубых ВОГ ( $1-10^\circ/\text{ч}$ ) значения составляющих модели погрешностей (не только смещения нулей, но и масштабный коэффициент (МК)) может изменяться как от пуска к пуску, так и во время непрерывной работы изделия. Увеличить точность курсоуказания системы, можно уточняя эти составляющие в ходе работы системы с использованием фильтра Калмана (ФК) [5].

Цель работы заключалась в увеличении точности курсоуказания за счет уточнения коэффициентов модели погрешностей триады ВОГ в процессе работы изделия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обзор современного состояния отечественных ВОГ и существующих гироскопических компасов на их основе;
- исследование моделей погрешностей триады ВОГ;
- идентификация шумовых составляющих выходного сигнала ВОГ;
- оценка наблюдаемости коэффициентов модели погрешностей триады ВОГ (смещений нулей и МК) для двух схем одноосного автокомпенсационного вращения;
- выбор закона и скорости автокомпенсационного вращения, обеспечивающих наилучшую наблюдаемость коэффициентов модели погрешностей триады ВОГ;
- исследование влияния уточнения коэффициентов модели погрешностей триады ВОГ на точность курсоуказания.

**Модель погрешностей триады ВОГ.** Выходной сигнал ВОГ зависит не только от измеряемой величины, но и от ряда факторов внешней среды, таких как температура, давление, магнитные поля и т.д. [6]. Эти зависимости устанавливаются в ходе калибровки и учитываются в процессе работы ВОГ. Калибровка позволяет значительно снизить влияние окружающей среды, но не исключить его полностью. Поэтому коэффициенты модели погрешностей триады ВОГ изменяются в ходе эксплуатации изделия, пусть и в меньшем диапазоне. Для увеличения точности выработки параметров ориентации необходимо оценивать коэффициенты модели погрешностей в ходе работы изделия [7].

В работе было решено использовать следующую модель погрешностей определения угловой скорости  $\delta\omega$ :

$$\begin{bmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_y \\ \delta\omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\omega_{0x} \\ \Delta\omega_{0y} \\ \Delta\omega_{0z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta M_{\omega x} & G_{xz} & -G_{xy} \\ -G_{yz} & \Delta M_{\omega y} & G_{yx} \\ G_{zy} & -G_{zx} & \Delta M_{\omega z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{\omega x} \\ \eta_{\omega y} \\ \eta_{\omega z} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\Delta\omega_{0j}, j = x, y, z$  – начальное смещение нуля и его нестабильность в пуске;  $\Delta M_{\omega j}$  – погрешность калибровки и нестабильность в пуске МК;  $G_{xy}, G_{xz}, G_{yx}, G_{yz}, G_{zx}, G_{zy}$  – углы отклонения измерительных осей блока гироскопов от системы координат;  $\omega_j$  – проекции угловой скорости на оси системы координат;  $\eta_{\omega j}$  – шумовая составляющая, характеризующая флуктуационные погрешности датчиков [8].

Уточнение параметров модели погрешностей в ходе работы осуществляется с помощью ФК с привлечением позиционных и (возможно, но не обязательно) скоростных измерений от внешних по отношению к бесплатформенной инерциальной навигационной системе (БИНС) измерителей [9]. Для корректной оценки квазипостоянных составляющих модели погрешностей необходимо задаться адекватной моделью шумовых составляющих выходного сигнала. Обычно шумовую составляющую представляют суммой белозумной и низкочастотной медленно меняющейся составляющей. В качестве второго слагаемого обычно выбирают марковский или винеровский процесс. Винеровский процесс характеризуется непрерывным нарастанием дисперсии во времени, в то время как у марковского процесса она ограничена [10].

### Наблюдаемость коэффициентов модели погрешностей триады ВОГ.

Автокомпенсационное одноосное вращение необходимо для создания динамики движения для разделения различных составляющих модели погрешностей триады ВОГ. При этом триада ВОГ может быть размещена «традиционным» способом (рис. 2, а) и «пирамидкой» (рис. 2, б).

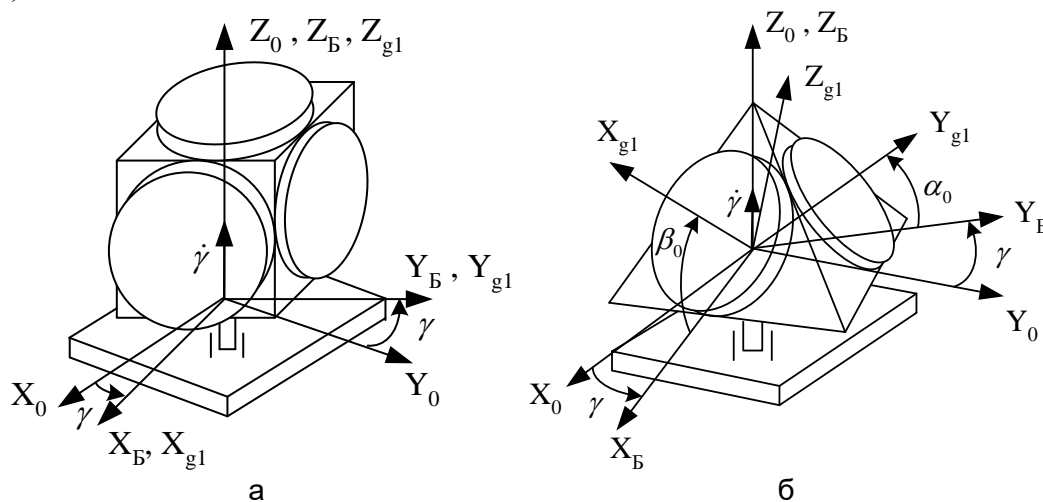


Рис. 2. Классическое расположение блока гироскопов традиционным способом (а) и «пирамидой» (б), где  $OX_0Y_0Z_0$  – трехгранник, жестко связанный с корпусом ВИИМ ( $X_0$  и  $Y_0$  параллельны посадочной плоскости прибора,  $Z_0$  направлена перпендикулярно посадочной плоскости вверх);  $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$  – трехгранник жестко связанный с конструктивными направлениями измерительных осей ВОГ;  $OX_B'Y_B'Z_B'$  – система координат, жестко связанная с блоком гироскопов (ось  $Z_B'$  – ось вращения блока, направлена вверх) [8]

На рис. 2 изображена система автокомпенсационного вращения, которая вращает блок с гироскопами вокруг вертикальной оси  $Z_0$ , совпадающей с осью  $Z_B'$ . Отметим, что система координат  $OX_{g1}Y_{g1}Z_{g1}$  совпадает с  $OX_B'Y_B'Z_B'$  [8].

На рис. 2, б, измерительные оси трех ВОГ номинально расположены перпендикулярно трем граням треугольной пирамиды, которая вращается относительно корпуса ВИИМ вокруг оси, соединяющей ее вершину с основанием, т.е. вокруг оси  $Z_B'$ .

Для этих двух вариантов построения измерительного блока были получены графики среднеквадратичного отклонения (СКО) смещения нулей и МК для триады ВОГ относительно начального значения (рис. 3).

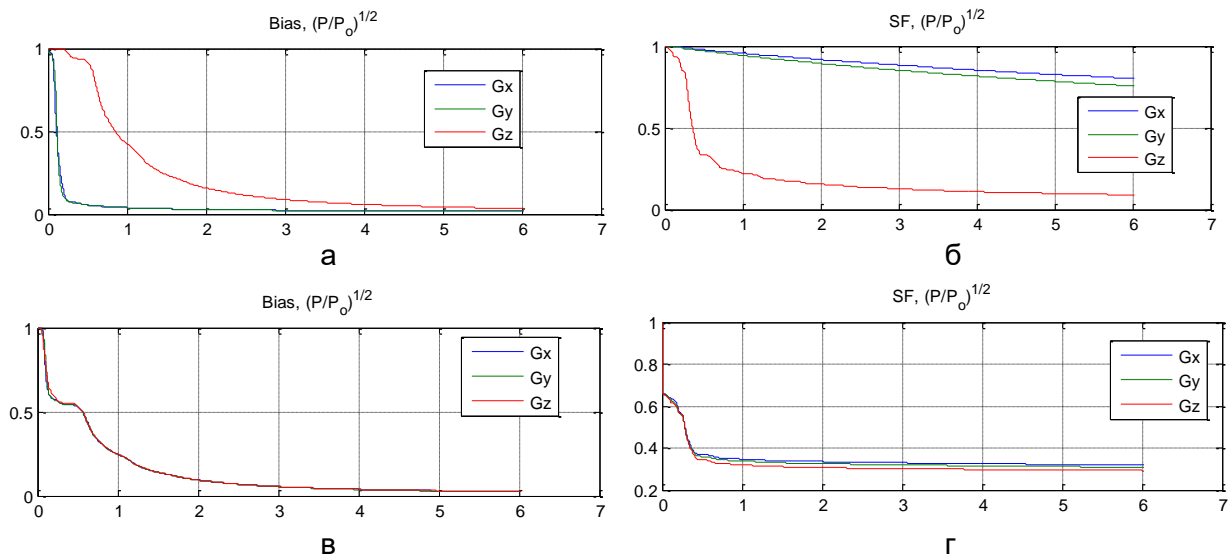


Рис. 3. Графики снижения СКО относительно начального значения для схемы рис. 2, а: смещения нулей триады ВОГ (а); МК триады ВОГ (б) и для схемы рис. 2, б: смещения нулей триады ВОГ (в); смещения нулей триады ВОГ (г)

Видно, что при использовании второй схемы для всех составляющих СКО погрешности оценивания снижается, что говорит об их наблюдаемости и возможности компенсации в алгоритмах БИНС.

**Заключение.** В данной работе описана модель погрешностей триады ВОГ, включая шумовую составляющую. Рассмотрены две схемы построения измерительного блока. Схема измерительного блока, в которой гироскопы расположены пирамидой, позволяет оценивать смещения всех нулей и масштабных коэффициентов триады ВОГ, что в дальнейшем позволит уточнять коэффициенты модели погрешностей триады ВОГ в ходе работы изделия, что должно повлиять на точность выработки угла курса. В дальнейшем предстоит выбрать закон и скорость автокомпенсационного вращения, обеспечивающие наилучшую наблюдаемость коэффициентов модели погрешностей триады ВОГ.

## Литература

1. Волоконно-оптический гироскоп [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sf.ifmo.ru/ru/partners/projects/fog>, своб.
2. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. – СПб.: Электроприбор, 2015. – 316 с.
3. Optical Gyros and their Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.214.8391&rep=rep1&type=pdf>, своб.
4. Бекар-Э. Малогабаритная система гироскопической стабилизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/besplatformennye-inertsialnye-navigatsionnye-sistemy/bekar-e/> (дата обращения: 27.02.2019).
5. Lefèvre H. The Fiber-Optic Gyroscope. – Second edition. – Boston-London: Artech House, 2014. – 416 p.
6. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Уэдда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.

7. Окоси Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К. Волоконно-оптические датчики / Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
8. Волынский Д.В., Драницына Е.В., Одинцов А.А., Унтилов А.А. Калибровка волоконно-оптических гироскопов в составе бескарданных инерциальных измерительных модулей // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 2(77). – С. 56–68.
9. Бурнашев М.Н., Филатов Ю.В. Основы лазерной техники: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. – 134 с.
10. Емельянец Г.И., Драницына Е.В., Блажнов Б.А. О калибровке погрешностей БИИМ на ВОГ в условиях стенда // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 3(78). – С. 55–63.

**Карпова Марина Владимировна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R4250Направление подготовки: 12.04.01 – Информационно-измерительные  
комплексы

e-mail: minina.marina24@gmail.com

**Федоров Алексей Владимирович**

Год рождения: 1962

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
д.т.н., профессор

e-mail: avfedorov@corp.ifmo.ru

**Прибыткин Павел Александрович**

Год рождения: 1982

ОАО «Авангард», к.т.н., начальник лаборатории

e-mail: pavel.pribitkin@gmail.com

УДК 681.586

**КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ  
ИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА****Карпова М.В.** (Университет ИТМО)**Научный руководитель – д.т.н., профессор Федоров А.В.** (Университет ИТМО)**Консультант – к.т.н. Прибыткин П.А.** (ОАО «Авангард»)

В работе рассмотрены конструктивные способы достижения высоких эксплуатационных свойств, таких как надежность и стойкость к внешним воздействующим факторам, при уменьшении габаритных размеров индукционных преобразователей угла.

**Ключевые слова:** цифровой преобразователь угла, преобразователь индукционного типа, индукционный энкодер, индуктосин.

Цифровой преобразователь угла (ЦПУ) – устройство, предназначенное для определения угла поворота контролируемого объекта. Угол относится к числу главных параметров, характеризующих состояние объекта. ЦПУ являются измерительными преобразователями, поэтому от качества решения ими своих функциональных задач существенно зависят технические характеристики систем управления, в частности, точность и быстродействие [1].

Значительное влияние на особенности построения и технические возможности ЦПУ оказывает выбор физического принципа считывания информации. На протяжении долгого времени самым перспективным являлся фотоэлектрический метод считывания, что объясняется присущими этому методу высокой точностью преобразования, высоким быстродействием, технологичностью и бесконтактностью [2, 3]. Однако низкая стойкость

фотодиодов к специальным факторам не дает возможности использовать фотоэлектрические ЦПУ в космическом пространстве.

В настоящее время активно развиваются индукционные ЦПУ. Главным достоинством этих преобразователей относительно фотоэлектрических является отсутствие большого количества чувствительных элементов, что тем самым позволяет достичь высокой надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам (ВВФ). Таким образом, актуальной остается задача высокой разрешающей способности и точности, при одновременном уменьшении габаритов ЦПУ [4].

ЦПУ индукционного типа, как и любые устройства, обладают своими недостатками, в частности высокой погрешностью. Поэтому в данной работе были рассмотрены конструктивные методы ее минимизации при влиянии ВВФ.

Цель работы – снижение погрешности индукционного преобразователя угла на основе разработки новых конструктивных способов.

Разрабатываемый ЦПУ индукционного типа (рис. 1) выполнен с использованием двух дисков, имеющих единичную и секционную многополюсные обмотки. Единичная обмотка формирует сигнал грубого отсчета, а секционная – точного.



Рис. 1. Внешний вид ротора и статора преобразователя индукционного типа

Конструкция статора первичного индукционного преобразователя показана на рис. 2. Она содержит три группы обмоток:

1. обмотка возбуждения (рис. 2, а), на которую подается меандр частотой около 400 кГц;
2. две двухполюсные приемные обмотки грубого отсчета (рис. 2, б), расположенные с фазовым смещением  $90^\circ$  друг от друга;
3. две двухполюсные приемные обмотки точного отсчета (рис. 2, в), расположенные с фазовым смещением  $90^\circ$  друг от друга и содержащие в данном преобразователе 8 периодов.

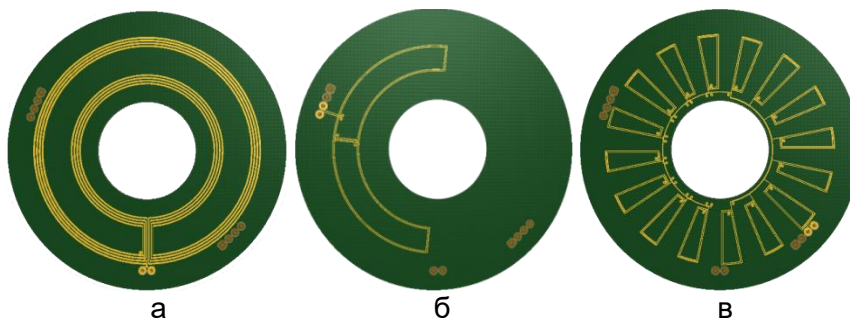


Рис. 2. Конструкция статора первичного преобразователя

Конструкция ротора первичного индукционного преобразователя представлена на рис. 3. Он состоит из двух последовательно включенных обмоток: приемной обмотки (рис. 3, а) и модулирующей обмотки (рис. 3, б). Приемная обмотка принимает энергию от обмотки возбуждения статора и модулирует сигнал грубого отсчета. Модулирующая обмотка представляет собой 8 двухполюсных встречно-последовательно включенных катушек, которые модулируют сигнал точного отсчета преобразователя.



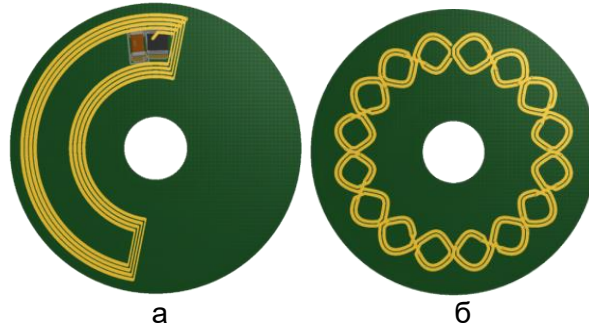


Рис. 3. Конструкция ротора первичного преобразователя: приемной обмотки (а) и модулирующей обмотки (б)

Принципиальная электрическая схема возбуждения и съема сигнала первичного индукционного преобразователя показана на рис. 4. Основными элементами являются трансформатор  $K1$  с входной индуктивностью  $L_1=7,1$  мкГн – обмотка возбуждения и выходной индуктивностью  $L_2=3,3$  мкГн – приемная обмотка ротора и коэффициентом связи  $k_{11-12}=0,3$ . Выходной трансформатор  $K2$  с входной индуктивностью  $L_3=1,1$  мкГн – модулирующая обмотка и выходной индуктивностью  $L_4=7,1$  мкГн – приемная обмотка статора и коэффициентом связи  $k_{13-14}=0,3$ , резонансный конденсатор  $C5=33$  нФ.

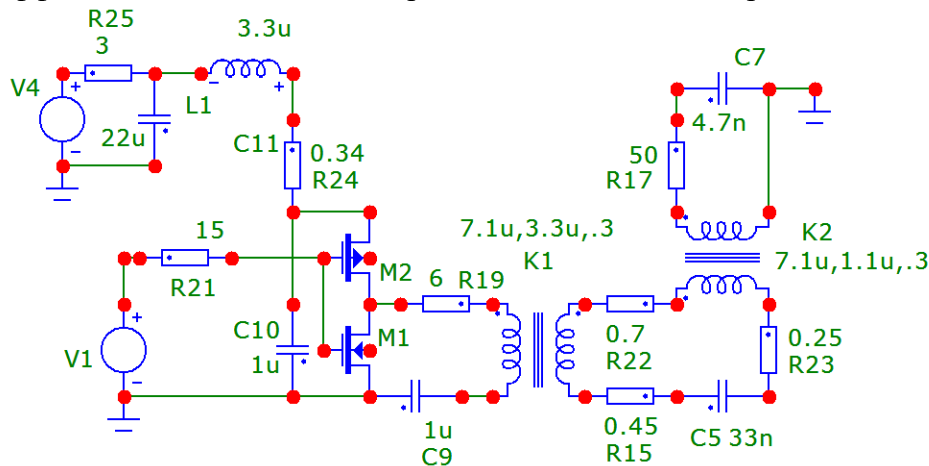


Рис. 4. Принципиальная схема первичного преобразователя

При расчете и выполнении обмоток индукционного преобразователя следует учитывать также то, что индуктивная связь между обмотками имеет место не только за счет связи между радиальными проводниками ротора и статора, но также за счет контурного тока, протекающего по соединениям между радиальными проводниками. Так как эти проводники соединены последовательно, то контурный ток не зависит от относительного углового положения дисков в интервалах, значительно больших шага обмоток ЦПУ. Эти токи, следовательно, складываются и вычитаются с периодически изменяющимися токами радиальных проводников, тем самым искажая синусоидальную связь между обмотками.

Влияние контурных токов было сведено к минимуму путем разделения обмоток ротора и статора на ряд секций с таким расчетом, что в одной или нескольких секциях контурный ток проходил в одном направлении, тогда как в одной или нескольких других секциях этот ток протекал в противоположном направлении. Центральный угол, занимаемый секциями с противоположными направлениями тока, должен при этом совпадать.

Еще одним недостатком, влияющим на чувствительность индукционного преобразователя, является паразитная индуктивность. Для ее уменьшения при выборе печатной платы индукционного преобразователя предложено перейти от круговой обмотки возбуждения к кольцевой. Что позволяет уменьшить влияние паразитной индуктивности в

центре датчика. Таким образом, влияние паразитной индуктивности сосредоточено в пределах площади кольца.

При моделировании были использованы две схемы возбуждения, представленные на рис. 5.

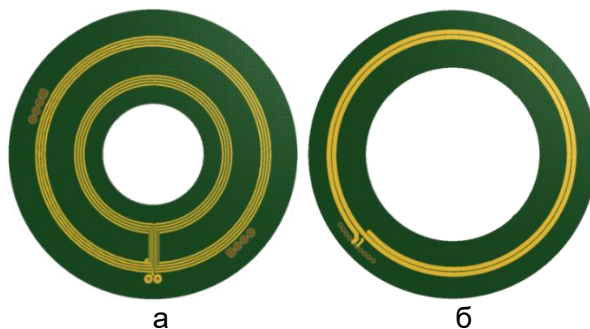


Рис. 5. Схемы возбуждения: кольцевая (а); круговая (б)

В результате проделанной работы, при переходе от круговой обмотки возбуждения к кольцевой паразитной индуктивности влияния контурных токов индукционного преобразователя угла сведены к минимуму, что позволяет снизить погрешность и улучшить технические характеристики датчика.

#### Литература

1. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
2. Ожиганов А.А., Прибыткин П.А. Кодовые шкалы на основе нелинейных последовательностей для преобразователей угловых перемещений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4(68). – С. 81–84.
3. Ростовский К.М., Ожиганов А.А. Кодовые шкалы на основе инверсно-сопряженных двоичных последовательностей // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 4. – С. 74–77.
4. Карпова М.В., Ростовский К.М., Прибыткин П.А. Разработка малогабаритных прецизионных цифровых преобразователей угла встраиваемого типа // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2018. – Т. 3. – С. 149–150.

**Касаткин Артем Николаевич**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41772Направление подготовки: 12.04.01 – Приборостроение

e-mail: kasatkin\_16@mail.ru

**Рассади́на Анна Александровна**

Год рождения: 1985

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н.

e-mail: a.a.rassadina@gmail.com

**УДК 533.6.08:532.1-3:681.2.087:616.211:620.179.1****ПРИМЕНЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ В ВЫЯВЛЕНИИ  
ФИЗИОЛОГИИ ДЫХАНИЯ****Касаткин А.Н.****Научный руководитель – к.т.н. Рассади́на А.А.**

С каждым годом развиваются и создаются все новые методы исследования, связанные с изучением человеческой физиологии и применяемые в медицине. Одним из таких разделов медицины, где такие методы применяются, является ринология. Данный раздел медицины изучает различные заболевания носа и носовой полости. Исследования в области диагностики и лечения заболеваний органов дыхания очень важны и актуальны, так как дыхательная система человека является одной из важнейших в функционировании организма. Применение таких методов, как методы неразрушающего контроля, позволят врачам-ринологам более широко взглянуть на проблему без хирургического вмешательства и предложить способы решения.

**Ключевые слова:** физиология дыхания, носовая полость человека, движение воздушных потоков, неразрушающий контроль, ринология, диагностика, моделирование дыхания, виртуальная операция.

Решение проблемы определения движения конвективных потоков воздуха в полости носа открывает возможности разработки и дальнейшего внедрения в медицинскую практику «виртуальных операций», что и определяет актуальность работы. Предполагается, что перед хирургическим воздействием будет выполняться математическое моделирование предстоящей хирургической операции на 3D-модели полости носа пациента, построенной по данным компьютерной томографии (КТ) (это и есть «виртуальная операция»). Такая операция позволит минимизировать хирургическое воздействие, что может быть достигнуто на основе понимания особенностей влияния анатомии конкретной полости носа на движение воздуха в полости при дыхании (понимание норм и патологии). Понимание путей движения воздуха в полости носа необходимо для создания адекватной математической модели. Для того чтобы определить движение конвективных потоков воздуха в носовых полостях различных типов и понять отличие движения воздушных потоков у здорового и больного человека, используются методы неразрушающего контроля. Также это позволит усовершенствовать возможности диагностики заболеваний верхних дыхательных путей.

Новизна заключается в том, что впервые будут установлены взаимосвязи между строением полости носа и процессами воздухообмена при дыхании; предложена концепция

движения воздуха в зависимости от формы полости носа, которая ляжет в основу модели «виртуальной операции».

Цель данной работы – исследовать физиологию носовой полости (рис. 1) и выявить направление движения и параметры воздушного потока, визуализировав движение воздуха.



Рис. 1. Схематическое изображение носовой полости во фронтальном срезе

Полость носа – миниатюрная, разветвленная структура, в которой анализ движения воздуха является сложной и индивидуальной для каждого типа полости задачей. Можно выделить три основных типа носовой полости человека, форма которых сформирована под климатическими особенностями ареала обитания [1]. Это европейский – узкая – лептокавитальная полость носа, это монголоидный – средняя мезокавитальная полость носа, и африканский – широкая платикавитальная полость. Примеры каждого типа полости носа, построенные на основе КТ, показаны на рис. 2.

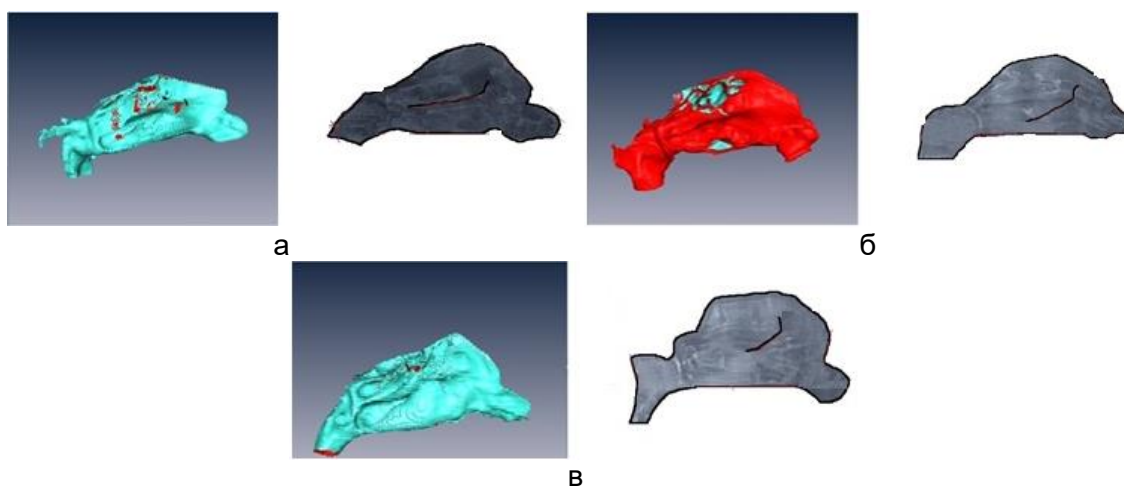


Рис. 2. 3D-модель лептокавитальной (узкой) (а); мезокавитальной (средней) (б) и платикавитальной (широкой) (в) полости носа, построенной по данным КТ после удаления пазух носа и ее боковой срез

Существует три метода исследования движения воздуха в носовой полости:

1. измерение параметров в полости носа;
2. численные методы;
3. экспериментальные методы.

Детально следует остановиться на методах измерения параметров в полости носа, так как они являются методами неразрушающего контроля. Это активная передняя риноманометрия и акустическая ринометрия.

Активная передняя риноманометрия и акустическая ринометрия позволяют объективно оценить носовое дыхание [2], и в настоящее время являются основными методами диагностики заболеваний верхних дыхательных путей. Сущность метода риноманометрии заключается в количественном измерении градиента давления и воздушного потока, которые

создаются в условиях физиологического носового дыхания. Результаты риноманометрии выдаются прибором в виде графика в системе координат градиент давления – расход воздуха, причем форма полученной кривой определяет степень нарушения носового дыхания.

Прибор для акустической ринометрии работает по принципу эхолота и дает возможность «зондировать» полость носа акустическим сигналом, имеющим частоту слышимого человеком звука (от 150 до 10 000 Гц). Звук, продвигаясь в полости носа, отражается от ее стенок, а отраженная звуковая волна регистрируется микрофоном, анализируется компьютером и представляется в виде кривых, характеризующих площадь поперечного сечения полости носа на различном расстоянии от его преддверия. Это помогает выявить основные преграды на пути воздушной струи. Оба метода ограничены миниатюрными размерами носа и не дают представления о движении воздуха по всей длине носовой полости, поэтому методы в основном используются для того чтобы отличать здорового от больного.

Однако для разрешения проблемы движения потоков воздуха в носовых полостях различного типа требуется использование экспериментальных методов [3]. Проанализировав все доступные возможности для проведения эксперимента, было решено использовать другую среду. Наиболее распространенной жидкой средой является вода. В ней можно использовать красители для подсветки потоков воды и, следовательно, визуализировать поток. Нужно принять во внимание, что вода является другой средой, поэтому и свойства у нее совершенно другие. Для того чтобы вода имела тот же самый характер движения (турбулентный или ламинарный) в той же самой геометрии, нужно пересчитать показатель, отвечающий за характер движения. Этим показателем является число Рейнольдса, которое можно рассчитать по формуле:

$$Re = \frac{vD}{\nu},$$

где  $v$  – скорость потока;  $D$  – диаметр;  $\nu$  – кинематическая вязкость.

Так как при одинаковой температуре воздух и вода имеют разные кинематические вязкости, то представляются два возможных варианта для уравнивания числа Рейнольдса:

1. изменение скорости;
2. изменение геометрических размеров полостей носа.

Вода может быть использована вместо воздуха, в случае равенства чисел Рейнольдса, что достигается путем регулирования объемного потока модели  $V_m$  в соответствии с уравнением [4]. Для вычисления отношения потоков вода/воздух авторы использовали кинематическую вязкость воздуха  $V_{\text{возд}}=15,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , примерно соответствующей температуре воздуха в полости носа, т.е.  $30^\circ\text{C}$ . В экспериментах температура воды около  $15^\circ\text{C}$ , а соответствующая ей вязкость  $V_{\text{воды}}=1,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Используя обе величины, отношение расходов будет равно  $V_{\text{воды}}/V_{\text{возд}}=1/13,86$ . Это указывает на уменьшение расхода воды примерно в 14 раз по сравнению с воздухом.

Было экспериментально обнаружено, что цветные растворы (чернила и т.д.) подходят для визуализации линий потока при использовании воды в качестве потоковой среды. Водные растворы применяются из-за их удельного веса и смешиваемости со средой. С помощью нескольких цветных растворов стало возможным создать три разных линии потока.

Также был произведен опыт с красителями: «синька» и фуорцин (рис. 3). С помощью медицинского шприца проводились опыты по введению водных растворов в сосуд с водой. Наблюдались диффузия и плавучесть растворов. Были получены удовлетворительные результаты: достаточно долгое время диффузии, хорошая плавучесть (водный раствор не тонет) и модели не окрашиваются этими растворами.

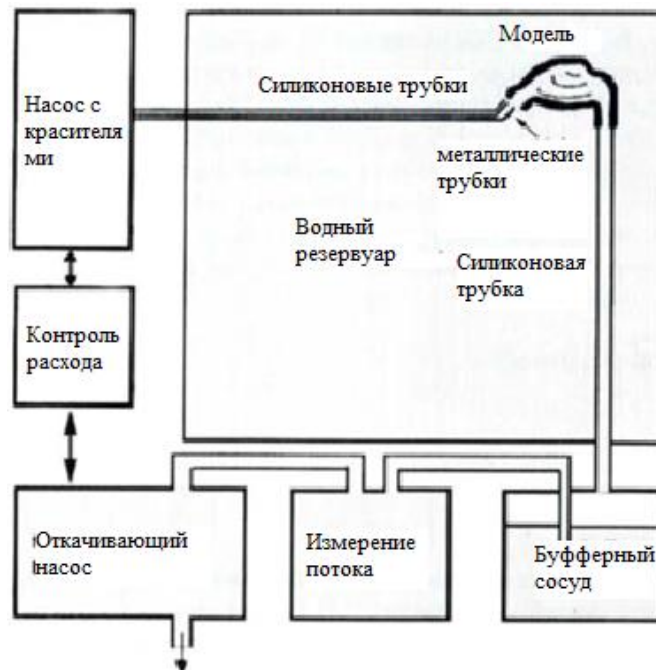


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Движение потока через модель производится с помощью всасывающего насоса, который связан с моделью силиконовой резиновой трубкой (внутренний диаметр 12 см). Буферный сосуд помещен на расстоянии 80 см от модели для обеспечения устойчивого потока при малых его скоростях. При выдохе направление трубы стабилизирует ламинарный поток, и вода входит в модель без турбулентности. Регулирование насоса непрерывно регулируется через электронный контроль, моделировавший фазы вдоха и выдоха. Расход соответствует расходу воздуха в физиологическом диапазоне от 0 мл/с до 800 мл/с.

Модель была погружена в резервуар с водой объемом 2 м<sup>3</sup>. Во время вдоха вода входит в модель как свободный поток из резервуара, чтобы имитировать вход воздуха в нос.

В ходе работы были изучены методы неразрушающего контроля и методы для визуализации воздушных потоков и потоков воды, пересчитаны скорости движения потоков при переходе от среды «воздух» к среде «вода», подобраны красители для визуализации потока, спроектирована экспериментальная установка для визуализации потоков воды. В данный момент заканчивается сборка установки и в ближайшее время планируется провести эксперимент.

### Литература

1. Гайворонский И.В., Гайворонский А.В., Неронов Р.В., Аподиакос Н.Е. Морфометрическая характеристика внутриносовых структур у плати-, мезо- и лепторинов // Российская оториноларингология. – 2010. – № 3(46). – С. 47–52.
2. Неронов Р.В., Гайворонский И.В., Гайворонский А.В., Ничипорук Г.И. Клиническая анатомия околоносовых пазух. – СПб.: Лема, 2017. – 36 с.
3. Неронов Р.В., Лукьянов Г.Н., Рассадина А.А., Воронин А.А., Малышев А.Г. Влияние формы полости носа на распределение воздушных потоков при вдохе // Российская оториноларингология. – 2017. – № 1(86). – С. 83–94.
4. Гладышев Н.Н. Гидрогазодинамика: конспект лекций. – СПб.: СПбГТУРП, 2012. – 159 с.

**Крылова Анастасия Андреевна**

Год рождения: 1994

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
аспирантНаправление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,  
оптические и биотехнические системы и технологии

e-mail: ananasn94@gmail.com

**Афанасьев Максим Яковлевич**

Год рождения: 1986

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: amax@niuitmo.ru

УДК 004.522

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОСОВЫХ АССИСТЕНТОВ ДЛЯ СБОРА  
ДАННЫХ В ИНДУСТРИАЛЬНЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ****Крылова А.А.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Афанасьев М.Я.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Голосовое управление помогает повысить эффективность во многих областях человеческой деятельности. Тем не менее, большинство исследований в этой области направлены на изучение общих аспектов данной технологии или применение ее в бытовых устройствах. На сегодняшний день практически нет исследований по использованию голосовых ассистентов в области промышленного производства, хотя идея получения данных таким способом может стать успешным решением для больших производственных площадей. Целью работы являлась разработка метода внедрения голосового ассистента в составе промышленной киберфизической системы для производственных процессов. Исследование включало создание прототипа модуля голосового ассистента на основе интерфейса прикладного программирования облачного голосового сервиса Алиса. В работе описаны аспекты использования голосовых помощников для доступа к производственным данным из промышленной киберфизической системы, упомянуты основные подходы к внедрению этой технологии. Исследование показало возможность использования голосового управления в производственных условиях и его потенциальную эффективность в автоматизации доступа к данным. **Ключевые слова:** голосовой ассистент, промышленная киберфизическая система, модульное оборудование.

Каждое предприятие по выпуску изделий сталкивается с большим количеством данных о производственном процессе. К ним относятся параметры станков, параметры обработки поверхностей, данные с датчиков и многое другое. С задачей сбора и упорядочивания информации справляются различные системы агрегирования данных, но не менее важна задача своевременной выдачи нужных данных оператору. Необходимо также подчеркнуть тот факт, что выдача данных должна быть оперативной, т.е., запрос должен быть обработан в максимально сжатые сроки, а сами данные должны быть представлены в удобном для оператора виде.

Хотя данные зачастую отображаются на экранах мониторов и дисплеях станков, часто возникают ситуации, когда этого недостаточно. Для этого необходимо сначала найти нужный дисплей, подойти к нему, отыскать в сложном интерфейсе программы нужное число и отправиться обратно. Очевидно, что чем больше площадь производственного участка, тем больше времени может быть затрачено на столь пустяковый с точки зрения производства момент. Для решения задачи оптимизации процессов, для упрощения считывания данных, в последнее время все чаще используется так называемая «дополненная реальность» – интеграция виртуальных объектов в изображение реального мира. Впервые опыт дополненной реальности при производстве был получен компанией Boeing в 1992 году: изображение проводных схем выводилось на корпус самолета, что существенно уменьшило число ошибок при производстве.

Сейчас системы дополненной реальности широко распространены как в сфере развлечений, так и в промышленности. Как правило, такие системы подразумевают носимое оборудование оператором в виде очков, но есть варианты, использующие встроенную камеру планшета или иного мобильного устройства. Одним из самых известных решений является немецкая компания RE'FLECT, специализирующаяся на производстве соответствующего оборудования для ведущих немецких предприятий. Другой бренд, EON Reality, пошел более простым путем и сосредоточился на разработке программного обеспечения для смартфонов и планшетов. Среди российских разработок в первую очередь известна Itorum MR.

Другим решением для оперативного получения информации являются голосовые помощники. Согласно литературным источникам, зрительный канал дает 80–90% всей информации [1], а второй по важности, слуховой, на производстве практически не задействован. К примеру, если в цехе коллега стоит рядом с нужным экраном, то спросить его намного проще, чем самому идти и искать нужный параметр. К тому же, зачастую руки у оператора заняты работой, и голосовое управление остается единственным возможным вариантом взаимодействия с информационной системой.

Перспективы голосовых помощников оценили еще в 70-х годах прошлого века, когда появились первые прототипы устройств по распознаванию речи. В последнее время почти все ведущие IT-компании имеют среди своих разработок голосового помощника: голосовой ввод от Google, Alexa от Amazon, Siri от Apple, Cortana от Microsoft, Alice от Yandex и другие. В настоящий момент их возможности существенно расширились от простого поиска информации до полноценного голосового управления различными бытовыми устройствами. Разумеется, в деле использования голосовых помощников в производственных условиях есть свои нюансы.

Также важной задачей является интеграция системы голосового помощника в структуру модульной архитектуры. Модульность – это современная концепция организации децентрализованной системы управления производственным оборудованием, направленная на повышение гибкости и масштабируемости системы. Как правило, такая архитектура подразумевает под собой не только физические компоненты, но и свое программное обеспечение, упрощающее интеграцию новых составляющих в систему управления. В описываемой в предыдущих работах архитектуре платформы каждая единица оборудования может быть представлена в виде совокупности модулей, которая управляется диспетчером.

Конечно, большинство модулей – это закрытые автономные сущности со своими задачами, но также могут существовать и зависимые компоненты системы. К зависимым относятся в основном датчики, которые в одностороннем порядке по запросу пересылают данные. Очевидно, что модуль голосового помощника будет носить автономный характер, поскольку его задача заключается только в общении с индустриальной киберфизической системой (ИКФС) напрямую, загрузке данных из «цифрового двойника» и выдача их оператору. Далее будут рассмотрены вопросы организации работы голосового помощника в промышленном оборудовании.



Цифровой двойник является основой рассматриваемой модульной ИКФС. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического устройства, имитирующая внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях воздействий помех и окружающей среды. Важной особенностью цифрового двойника является то, что для задания на него входных воздействий используется информация с датчиков реального устройства, работающего параллельно. Работа возможна как в онлайн-, так и в офлайн-режимах. Далее возможно проведение сравнения информации виртуальных датчиков цифрового двойника с датчиками реального устройства, выявление аномалий и причин их возникновения. Таким образом, происходит совмещение реального производственного процесса с его цифровой моделью, при этом воздействие на модель приводит к изменению физического процесса и наоборот.

Очевидно, что основой модульной ИКФС является модуль. Модуль может являться автономным устройством, либо входит в состав единицы производственного оборудования. В соответствии с данной концепцией ядром цифрового двойника CPPS является распределенный реестр, представляющий собой децентрализованную базу данных. С технической точки зрения данный реестр является бинарным JSON-деревом, хранящим все данные о производственном процессе, а также позволяющем модулям регистрироваться в системе и объединяться для решения совместных задач (в рамках единицы промышленного оборудования), т.е. является агрегатором данных и сервисов ИКФС [2]. Взаимодействие между модулями осуществляется через ячеистую (mesh) сеть на основе протокола OpenThread [3, 4].

Реестр представляет собой совокупность узлов, каждый из которых является либо унитарным, либо модульным устройством. И в том, и в другом случае весь функционал единицы оборудования определяется с помощью диспетчера, в котором могут регистрироваться модули. Если в диспетчере зарегистрирован всего один модуль – это унитарное устройство, если несколько – модульная единица промышленного оборудования. Таким образом, диспетчер может быть сконфигурирован на подключение определенного количества модулей, которое может варьироваться от 1 до 32, что задается на этапе проектирования нового оборудования, интегрируемого в ИКФС.

Модуль регистрируется в диспетчере при физическом подключении к нему. Под каждый модуль выделяется отдельный слот. Слот – это структурная информационная единица реестра, в которой хранится информация о сервисах, принимаемых командах и данных, которые он могут быть переданы в сеть ИКФС. Слот включает в себя следующие поля:

- адрес;
- название модуля/датчика;
- функции;
- возвращаемое значение;
- пределы возвращаемого значения.

Совокупность данных от всех модулей диспетчера определяет параметры единицы оборудования, совокупность данных от всех диспетчеров – параметры ИКФС в целом.

Модульными могут быть роботизированные системы (склады, автономные транспортные роботы, многокоординатные промышленные роботы), конвейеры и поточные линии, промышленное оборудование с числовым программным управлением. В то время как различные датчики производственного процесса, а также оборудование для индикации и оповещения являются унитарными устройствами, т.е. с точки зрения программной реализации совмещают в себе функции диспетчера и одного модуля, подключенного к нему.

В качестве примера можно рассмотреть модульное оборудование с числовым программным управлением. Подобное оборудование можно условно представить как совокупность многокоординатного шасси, осуществляющего перемещение в пространстве какого-либо модуля, определяющего назначение единицы оборудования, а также совокупности определенных внешних блоков. Например, оборудование для селективного

отверждения фотополимеров состоит из трех модулей: шасси, лазерной головки и внешнего источника лазерного излучения, а также совокупности датчиков, определяющих возвращаемое значение.

При этом каждый из модулей регистрирует свои функции в виде доступных G-кодов и M-функций в соответствии со стандартами ISO 6983-1 и ISO/TR 6983-2. Возвращаемое значение не обязательно должно быть одним. Описание каждого из них включает в себя тип, пределы и массив значений с временными метками. Диспетчер контролирует выход каждого значения за допустимые пределы, и в случае возникновения такой ситуации – осуществляет анализ возникшей ошибки, и принимается решение о возможности или невозможности продолжения работы оборудования.

Очевидно, что в соответствии с представленной ранее концепцией, голосовой ассистент будет являться унитарным устройством, работающем на уровне ИКФС. Основной функцией голосового ассистента является получение команд, передачи их в облачный сервис для распознавания, а также выдачи результата в виде звукового сообщения. Общая архитектура модульной ИКФС с применением голосовых ассистентов представлена на рисунке.

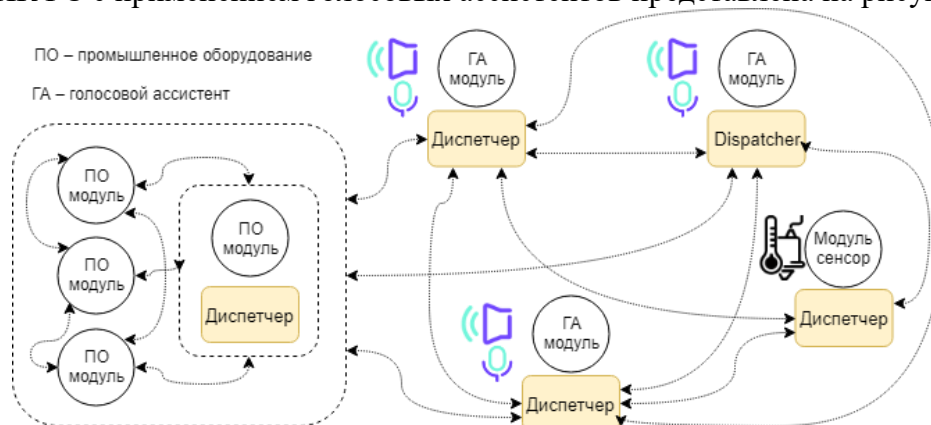


Рисунок. Общая архитектура ИКФС с модулями голосового ассистента

Как уже отмечалось ранее, в реестре с каждым модулем ассоциирован набор датчиков и пределы допустимых значений для каждого из них. Поэтому первый сценарий работы голосового ассистента – это оповещение о выходе какого-либо параметра за допустимые значения. Данная задача является многоуровневой, так как структура реестра плоская, т.е. данные от всех датчиков постоянно доступны на уровне ИКФС. Выход значений за допустимые пределы является нарушением работы ИКФС и распространяется по всей сети, как только один из диспетчеров детектирует это событие.

Поэтому возникает вопрос, на каком уровне осуществлять оповещение о нарушении какого-либо параметра. Предлагается следующее решение. Все датчики в системе ранжированы по степени их влияния на производственный процесс. В соответствии с данными рейтингом реализована отдельная настраиваемая политика оповещения, включающая в себя следующие уровни:

- общепроизводственный уровень (критическая ошибка, все модули синхронизируются по времени, и осуществляется передача сообщения по громкой связи);
- локальная ошибка единицы оборудования (сообщение через ближайший модуль, протокол OpenThread позволяет определять соседние узлы в ячеистой сети);
- незначительная ошибка (не произносить сообщение, внести в общий лог, зажечь сигнальную лампу или вывести предупреждение на пульт).

Осуществлять ранжирование будут эксперты на этапе проектирования ИКФС. С точки зрения общего реестра для каждого датчика добавляется дополнительное поле level со значениями от 0 до 2. Таким образом, структура слота реестра будет выглядеть как на рисунке.

Второй сценарий использования голосового ассистента в представляемой структуре ИКФС – это получение данных о текущих параметрах оборудования. В соответствии с принятой моделью представления данных в реестре у каждого унитарного модуля и каждой единицы оборудования есть уникальный машиночитаемый идентификатор, который позволяет искать его в реестре. Для голосового ассистента добавлен дополнительный идентификатор, который отображается на дисплее модуля голосового ассистента. В качестве идентификатора используется четырехзначное число, уникальное для производственного помещения.

В системе реализованы команды, с помощью которых оператор может запросить у ассистента перечень всех ближайших к нему модулей или единиц оборудования, если модуль находится вне прямой видимости оператора. Также могут быть реализованы и другие команды выборки по каким-либо параметрам. Для каждого унитарного модуля или единицы оборудования голосовой ассистент может вывести перечень доступных параметров. В результате получается следующая голосовая команда <ключевое слово для доступа к голосовому ассистенту> <идентификатор> <параметр>, например, <4375> <температура>. Человеческая память работает таким образом, что через некоторое время оператор запомнит идентификаторы важных для него производственных единиц и названия параметров, которые интересуют его чаще всего, благодаря чему скорость доступа к данным значительно увеличится.

Модуль голосового ассистента включает в себя управляющий блок и периферийные устройства: микрофон, динамическую головку и дисплей. Прототип модуля построен на базе микрокомпьютера Raspberry Pi 3 и модуля Nordic Semiconductor nRF52840, отвечающего за взаимодействие по радиоканалу по протоколу OpenThread.

В прототипе используется API облачного голосового сервиса Алиса [4] от компании Яндекс, позволяющая взаимодействовать с облачным сервисом посредством программной библиотеки, написанной на языке программирования Python. Микрокомпьютер отвечает за получение данных от микрофона, вывод сообщений на встроенный динамик и интеграцию в общую структуру ИКФС, а также обращение к облачному сервису Алиса. Также в структуре присутствует сервис получения команд от Алисы и перевод его в запросы, используемые в модульной рассматриваемой ИКФС (формирование сообщения по протоколу papomsg для выборки данных из реестра).

Со времени появления исследований на тему распознавания речевых конструкций, голосовое управление служило одним из атрибутов жизни будущего, однако, сейчас эта технология уже стала частью настоящего. Алгоритмы обработки входной звуковой информации продолжают совершенствоваться в качестве и скорости распознавания, уже сейчас существует большое число коммерческих продуктов, обладающих обширным функционалом, возможностью отфильтровывать окружающий шум, настраиваться на голос оператора и выполнять довольно сложные команды.

В работе были рассмотрены аспекты применения голосовых помощников в качестве канала доступа к данным киберфизической системы. Как можно заключить, внедрение подобной технологии может быть оправдано на больших производственных участках, где сложно в короткие сроки найти монитор с нужной информацией и добраться до него. Были проанализированы подходы к внедрению технологии в модульное оборудование, определены возможные сложности эксплуатации и задачи, требующие дальнейших исследований.

## Литература

1. Линдгрэн Н. Органы чувств животных и их электронные аналоги // Электроника. – 1962. – Т. 35. – № 7. – С. 22–27.
2. Afanasev M.Y., Fedosov Y.V., Krylova A.A. and Shorokhov S.A. Modular industrial equipment in cyber-physical production system: Architecture and integration // Proceedings of the 21<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2017. – P. 3–9.

3. Afanasev M.Y., Fedosov Y.V., Krylova A.A. and Shorokhov S.A. An application of microservices architecture pattern to create a modular computer numerical control system // Proceedings of the 20<sup>th</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2017. – P. 10–19.
4. Afanasev M.Y., Fedosov Y.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A. and Zimenko K.V. Mesh networking in cyber-physical production systems: Towards modular industrial equipment integration // Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Conference of Open Innovations Association FRUCT. – 2018. – P. 3–11.
5. Яндекс диалог. Документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tech.yandex.ru/dialogs/alice/doc>, своб.

**Куприянов Дмитрий Владимирович**

Год рождения: 1991

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
ст. преподаватель

e-mail: kupriyanov@corp.ifmo.ru

УДК 378.4

**ВОПРОСЫ МОТИВАЦИИ И САМООРГАНИЗАЦИИ СТУДЕНТОВ****Куприянов Д.В.**

В работе рассмотрены вопросы мотивации и самоорганизации студентов первого курса. Обзор проводился на основании ответов, полученных от более чем 50 студентов первого курса направлений: «Мехатроника и робототехника» и «Инерционно-навигационные системы». Сделан вывод об изменении мотивации студентов в выборе специальности при поступлении в высшее учебное заведение.

**Ключевые слова:** мотивация, образовательная среда, самодетерминация, самоорганизация, успешность, ценности, интересы, возможности.

Быстрое развитие информационных технологий в течение последних десятилетий не могло не изменить образ мышления человека и общественное отношение к специальностям, так или иначе, с ними связанными. Из маленькой группы энтузиастов, состоящей в основном из людей, по тем или иным причинам получивших доступ к компьютерным технологиям на рубеже столетий, специалисты в области информационных технологий стали представителями известной и уважаемой в обществе профессии.

Высокие темпы роста доступности электроники и микропроцессорной техники, а также все более широкое проникновение сети Интернет в повседневную жизнь людей привело к значительному увеличению популярности проектов, связанных с созданием собственных устройств [1].

Рост интереса абитуриентов к специальности, особенно междисциплинарной, как «Мехатроника и робототехника», вызывает вполне закономерный интерес к тем факторам, которые определили выбор абитуриентов.

Среди первокурсников направлений «Мехатроника и робототехника» проводился опрос, в рамках которого студентам было предложено в вольной форме ответить на вопрос о том, почему они выбрали именно эту специальность. Также у студентов была возможность указать, какие культурные объекты или события привели их к подобному решению.

По результатам анализа ответов можно сказать, что заметные изменения в мотивации студентов произошли в течение последних четырех лет. Большинство ответов того или иного потока студентов связано с той или иной популярной на момент опроса технологией или популярной личностью. Так, в 2015 году наиболее популярные ответы включали в себя:

- технологии быстрого прототипирования;
- квадрокоптеры;
- космонавтика.

Для 2017 года наиболее характерными ответами уже стали:

- бионические системы;
- протезирование;
- космонавтика.

Опрошенные студенты часто упоминали Илона Маска, Стива Джобса, из их ответов можно сделать вывод, что некоторые из них следили за научно-популярными новостями и примерно представляли себе положение дел в интересующей их отрасли.

С другой стороны междисциплинарный характер специальности служит для значительного процента неопределившихся студентов возможностью отложить решение с выбором будущей специальности и сделать выбор в процессе получения образования. Стоит учитывать это обстоятельство и включать прикладные примеры использования рассматриваемых тем в образовательные программы дисциплин.

В рамках курса «Психологии предпринимательства» первокурсникам 2018 года было дано следующее задание. Студентам было предложено записать события, происходившие в их жизни в течение 10 дней и дать им оценку с точки зрения эмоционального фона, удовлетворенности результатом, а также определить, происходило оно под воздействием внешней или внутренней мотивации. Позже, по результатам наблюдений, студенты написали эссе, в которых провели самоанализ распределения собственного времени и отношения к реактивным событиям в их жизни.

Исходя из более 50 обработанных работ, можно сделать вывод, что большую часть своего времени первокурсники проводят исходя из интринсивных побуждений. Наиболее ярко выраженной оказалась неудовлетворенность необходимостью тратить несколько часов каждый день на перемещение из одной точки в другую, а также выполнять задания по какому-либо «нелюбимому» предмету.

Некоторую озабоченность вызывает тот факт, что около половины респондентов стараются сконцентрироваться исключительно на личной эффективности и порой доходят до крайностей, считая сон более 5–6 ч в день и развлечения любой продолжительности своей «слабостью и ленью», препятствующими им в профессиональном развитии. Для некоторых профессиональное развитие подменяет развитие личностное, что может послужить причиной для возникновения и развития неврозов.

Исходя из последних психологических исследований [2], можно сделать вывод, что самоконтроль не является достаточной основой для личной эффективности.

Полученные в итоге опроса материалы могут послужить основой для расширения и добавления новых тематических занятий в курс «Психологии предпринимательства».

## Литература

1. Федеральная служба государственной статистики // Выборочное федеральное статистическое наблюдение по вопросам использования населением информационных технологий и информационно-телекоммуникационных сетей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/it/fed\\_nabl-croc/index.html](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/it/fed_nabl-croc/index.html), своб.
2. Duckworth A.L., Milkman K.L. & Laibson D. Beyond Willpower: Strategies for Reducing Failures of Self-Control // *Psychological Science in the Public Interest*. – 2018. – V. 19(3). – P. 102–129.

**Малашенков Константин Сергеевич**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3430Направление подготовки: 27.03.04 – Управление движением  
и навигация

e-mail: malash.kostya@gmail.com

**Елисеев Даниил Павлович**

Год рождения: 1987

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ст.н.с.

e-mail: eliseev.dp@gmail.com

УДК 658.5.012.1

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ****Малашенков К.С.** (Университет ИТМО), **Елисеев Д.П.** (Университет ИТМО; АО «Концерн  
«ЦНИИ «Электроприбор»)**Научный руководитель – к.т.н. Елисеев Д.П.**  
(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Рассмотрены основные материалы, используемые в аддитивных технологиях. Проведен анализ возможности их применения при проектировании приборов навигации.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-моделирование, навигация, 3D-печать, производство.

**Введение.** В настоящее время классические технологии обработки деталей, например, токарные и фрезерные операции, достигли немалых вершин в развитии и используются повсеместно, в том числе при изготовлении приборов навигации. Однако указанным операциям присуще такие ограничения, как невозможность получения деталей самой сложной формы (такие как пустотелые детали или детали с бионическим дизайном) и низкий коэффициент использования материала. Учитывая существенное развитие аддитивных технологий, представляется актуальной задача оценки возможности их использования при проектировании приборов навигации с целью ухода от указанных ограничений.

**Определение аддитивных технологий.** Аддитивные технологии представляют собой изготовление объекта с использованием его цифровой модели методом послойного добавления материала. Каждый слой фиксируется и твердеет, создавая сечение САД-модели [1]. Происходит соединение каждого последующего слоя с предыдущим для формирования изготавливаемой детали. Соединение слоев может происходить совершенно различным способом: спеканием, склеиванием, сплавлением, полимеризацией – в зависимости от параметров конкретной технологии. Наглядный пример работы 3D-принтера представлен на рис. 1.

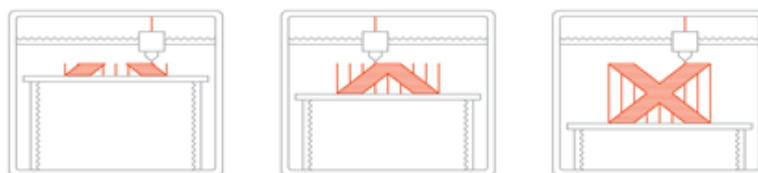


Рис. 1. Процесс 3D-печати

Из приведенного определения можно сформулировать преимущества аддитивных технологий над классическими методами:

1. происходит «добавление» материала до тех пор, пока деталь не сформируется, в то же время в классическом методе используется «вычитание» материала из заготовки. Отсюда следует, что по сравнению с традиционными методами получения деталей, внедрение аддитивных технологий помогает значительно увеличить коэффициент использования материала. Таким образом, экономия сырья на производстве может достигать до 75% и выше [2], что является важнейшим показателем экологичности по отношению к природному запасу ресурсов;
2. при использовании аддитивных технологий все стадии реализации проекта от идеи до реализации может находиться в единой CAD\CAM\CAE-системе [1], например, PTC Creo. Это означает, что для изготовления детали объемы бумажной конструкторской и технологической документации значительно сокращаются.

**Обзор материалов и их применение.** На сегодняшний день аддитивные технологии широко применяются в самых различных отраслях и сферах жизнедеятельности человека, таких как авиастроение, машиностроение, горная промышленность, медицина, архитектурная деятельность и т.д. Рынок изделий, изготовленных данным способом, представляет множество различных устройств и изделий, начиная от простых фигурок и деталей, представленных на рис. 2, заканчивая одноразовыми медицинскими инструментами, протезами и даже огнестрельным оружием. Широкий спектр использования в основном обуславливается тем, что применение аддитивных технологий дает возможность выбрать материал, подходящий для той или иной деятельности.



Рис. 2. Примеры работы 3D-принтера с различными материалами

На данный момент можно выделить пять групп материалов, которые успешно используются в самых разных отраслях.

1. Гипс – простой, эффективный и универсальный материал, который используется для создания макетов, прототипов деталей, сувенирной продукции и т.д.
2. Воск – экологически безопасный, бесконтактный растворимый материал, повсеместно используемый при изготовлении продукции методом литья по выплавляемым моделям. С выплавляемой модели снимается литейная форма, в которую затем заливают расплавленный металл и получают конечное изделие.

Указанные материалы подходят для изготовления макетов и уникальных моделей на различные выставки и демонстрации в качестве средства маркетинга для рекламы предприятия.

3. Фотополимеры – один из перспективных и популярных материалов на аддитивном производстве. Преимущество данного материала заключается в его универсальности. Под воздействием лазера или ультрафиолета жидкий фотополимер затвердевает и приобретает



совершенно разные механические свойства (жесткость, ударопрочность, эластичность и т.д.) и характеристики (цвет, прозрачность и т.д.). При этом изделия из фотополимера очень гладкие и детализированные. Также они могут быть с совершенно различной по сложности геометрией, и хорошо поддаются постобработке. Отлично подходят для изготовления пресс-форм и мастер-моделей для литья, тестовых образцов продукции и детализированных образцов для проверки собираемости навигационных приборов.

4. Полиамид и полистирол – материалы, используемые в машиностроении, аэрокосмической отрасли и в производстве потребительский товаров. Полиамид может быть как в виде самого простого пластика, так и специального материала, в зависимости от добавок (стеклонаполненный, угленаполненный и металлонаполненный). Специальные полиамиды способны уменьшить вес конструкции, сохраняя при этом физико-механические свойства детали. Полистирол, в свою очередь, используется для промышленного литья и служит для создания форм.
5. Металл – самый востребованный материал в промышленности. Для производства деталей из металлов на данный момент доступно около 20 сплавов и их количество постоянно увеличивается. Стоит отметить, что в аддитивных технологиях используются не только стандартные сплавы, но и уникальные высокотехнологичные материалы для решения специфических задач (например, при экранировании от электромагнитных полей или излучений различной природы). Металлические детали, изготовленные аддитивным способом, находят применение в автомобильной, нефтегазовой, аэрокосмической, пищевой промышленности, электронике, машиностроении, медицине.

В навигационном приборостроении появляется возможность использования аддитивных технологий в совокупности с классическими методами получения металлических изделий (литья, проката,ковки и т.д.).

#### **Применение аддитивных технологий при проектировании приборов навигации.**

Исходя из вышеперечисленных примеров использования 3D-технологий, появляется большой спектр для возможности их применения при производстве навигационных приборов. Начиная от создания простых форм для отливки и создания макетов для выставок, заканчивая изготовлением неточных, но геометрически сложных деталей. Также применение аддитивных технологий способно положительно повлиять на ныне существующие проблемы проектирования приборов навигации, с которыми тяжело или не выгодно использовать классические методы:

1. быстро изготавливать детали самой сложной геометрии, к которым не предъявляются высокие требования к точности формы и расположения поверхностей (количество таких деталей в одном гироскопическом приборе может достигать нескольких десятков);
2. уменьшить массогабаритные характеристики изготавливаемых приборов (что особенно актуально в условиях увеличения требований к их миниатюризации [3]);
3. разрабатывать механические фильтры [4] оптимальной геометрической формы для уменьшения влияния внешних воздействующих факторов (температуры, вибраций, ударов, магнитных полей).

**Заключение.** Аддитивные технологии имеют отличную перспективу внедрения в навигационную отрасль. С их помощью можно быстро изготавливать детали сложной геометрии, уменьшать массогабаритные характеристики приборов и разрабатывать механические фильтры различной формы, при этом значительно увеличив коэффициент использования материала.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-образовательного центра АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и лично его руководителю д.т.н., профессору О.А. Степанову.

### Литература

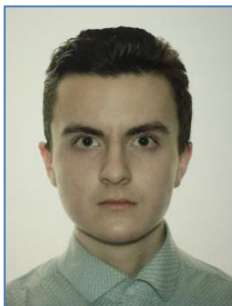
1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии – технологии XXI века. Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012. – С. 3–4.
2. Наумкин Н.И., Кильмяшкин Е.А., Ломаткин А.Н. Обучение аддитивным технологиям как способ формирования конструкторских компетенций у студентов технических вузов // VIII международная конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы». Сборник трудов. – 2016. – С. 536–540.
3. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1. – С. 3–16.
4. Yakimova A. et al. Methods to increase the resistance of an inertial measurement unit to external mechanical and thermal actions // 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – 2017. – P. 1–3.

**Осинкин Егор Александрович**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3435Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: egoros97@yandex.ru

**Пачковский Константин Андреевич**

Год рождения: 1967

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3442Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: k.pachkovski@corp.ifmo.ru

**Зенкин Артемий Михайлович**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3435Направление подготовки: 15.03.06 – Мехатроника и робототехника

e-mail: a.zenkin@corp.ifmo.ru

УДК 004.93+004.942

**МОНОКУЛЯРНЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ И ЛОКАЛИЗАЦИИ  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА****Осинкин Е.А., Пачковский К.А., Зенкин А.М.****Научный руководитель – к.т.н. Капитонов А.А.**

В работе рассмотрен не прямой разреженный метод SLAM. Этот подход основан на трекинге ключевых точек между последовательными кадрами. По перемещению ключевых точек в плоскости изображения при достаточном их количестве можно оценить перемещение камеры в трехмерном пространстве. Зная перемещение камеры, можно спроецировать точки обратно в трехмерное пространство и получить карту в виде разреженного облака точек.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, локализация, картирование, проективная геометрия, эпиполярная геометрия, прямой SLAM, не прямой SLAM.

Исследования задачи SLAM (Simultaneous localization and mapping) ведутся с середины 80-х годов XX века, однако до начала XXI века на практике такие алгоритмы не применялись в силу отсутствия компактных и в то же время достаточно мощных компьютеров. О полноте и качестве решения задачи SLAM невозможно рассуждать без учета конфигурации платформы, для которой разрабатывается алгоритм. Сложность задачи сильно зависит от имеющихся на платформе датчиков и требований, предъявляемых к карте. Например, сравнительно простой задачей может быть построение 2D-карты роботом с ультразвуковыми датчиками и энкодерами на колесах. Точная локализация камеры лишь по последовательности изображений одновременно с построением трехмерного облака точек, напротив, является крайне сложной задачей. Как следует из примеров, задача SLAM может быть решена с использованием различных датчиков.

По способу обработки визуальной информации алгоритмы SLAM подразделяются на не прямые и прямые. Непрямые или feature-based алгоритмы осуществляют трекинг положения камеры посредством поиска и отслеживания особых (ключевых) точек между последовательными кадрами. Особые точки находятся в неоднородных областях изображения. В зависимости от алгоритма-детектора это могут быть углы или участки перепада интенсивности. Как правило, используется детектор ключевых точек ORB [1]. Feature-based методы создают разреженные облака точек, легко справляются с ошибочно найденными точками, а также менее требовательны к точности инициализации и калибровки камеры в сравнении с прямыми методами.

Алгоритмы прямого SLAM основаны на минимизации фотометрической ошибки. Предположение о новом положении камеры выдвигается таким образом, чтобы минимизировать разность интенсивностей пикселей между кадрами. Иными словами, производится сравнение целых кадров, а не подмножеств пикселей. К недостаткам прямых методов относятся сложная инициализация, необходимость точной оценки внутренних параметров камеры, а в некоторых случаях и неустойчивость к резким перемещениям, которая может быть частично компенсирована высокой частотой кадров.

По плотности карты SLAM подразделяется на плотный, полуплотный и разреженный; по количеству камер – на монокулярный и стерео. Также для задач картирования и локализации часто используют RGBD-камеры и лидары. Из всех вышеперечисленных способов монокулярный SLAM является наиболее оптимальным для квадрокоптера Parrot ARDrone 2.0, обладающего небольшой грузоподъемностью. Установка RGBD-камеры или стереопары неизбежно ухудшит динамику дрона. Только монокулярный подход не потребует никаких конструктивных изменений. Главным недостатком картирования по одной камере является то, что абсолютный масштаб невозможно определить без использования дополнительных датчиков, например, дальномера, расположенного в нижней части дрона.

Как правило, результатом монокулярного SLAM, основанного на поиске ключевых точек, является разреженная карта, однако существует решение [2] с использованием сверточных нейронных сетей, которое позволяет построить плотную карту. В работе был рассмотрен классический способ получения разреженной карты.

Описание алгоритма SLAM начато с модели камеры. Для точки в  $X$  трехмерном пространстве рис. 1, а, формула проекции на плоскость изображения выглядит следующим образом:  $\mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}][\mathbf{X} \ 1]^T$ , где  $\mathbf{K}$  – матрица внутренних параметров камеры;  $\mathbf{R}$  – ортогональная матрица поворота;  $\mathbf{t}$  – вектор-столбец смещения, а  $[\mathbf{X} \ 1]^T$  – вектор столбец положения реальной точки, записанный в однородных координатах.

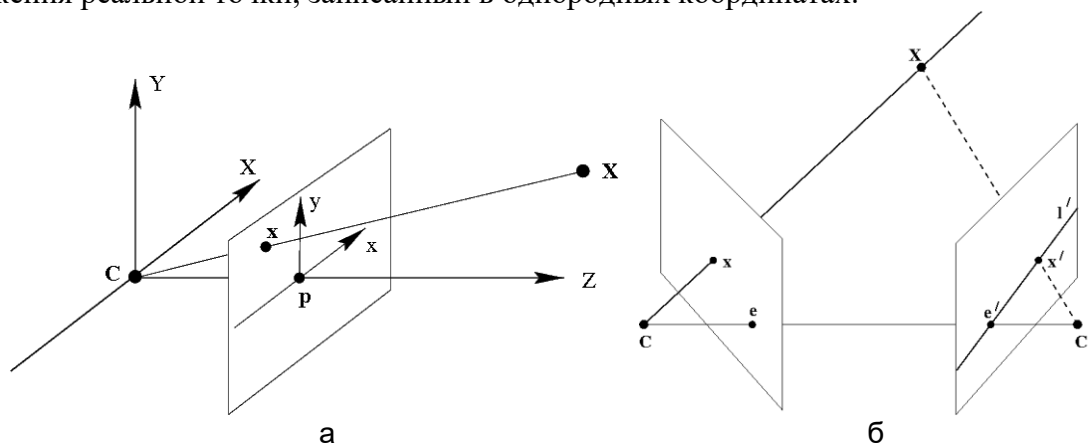


Рис. 1. Модель камеры (а); эпиллярное ограничение (б)

Поиск ключевых точек производился при помощи алгоритмов FAST [3] и ORB [1]. Отслеживание ключевых точек FAST осуществлялось с использованием метода KLT tracker

[4], а для ключевых точек ORB был использован метод библиотеки OpenCv brute-force matching. В случае с brute-force matching для качественного отслеживания ключевых точек необходимо осуществлять проверку и удалять ложные соответствия. Одним из критериев проверки является утверждение, что наилучшее соответствие из первого изображения во второе должно совпадать с наилучшим соответствием из второго в первое. Самой эффективной фильтрацией является фильтрация по эпиполярному ограничению рис. 1, б, которая подразумевает, что наблюдаемые точки, лежащие на одной линии для первого положения камеры, также будут лежать на одной линии после смещения камеры. В основе метода KLT лежит оценка области, в которой ключевая точка окажется на следующем кадре. Отследив ключевые точки в двух последовательных кадрах, оцениваем поворот и смещение камеры, для этого необходимо знать существенную матрицу  $E$  размерностью  $3 \times 3$  такую, что  $(x_1')^T E x_2' = 0$ , где  $x_1'$  и  $x_2'$  – нормализованные однородные координаты одной точки в двух последовательных кадрах. Наиболее эффективным с точки зрения производительности и робастности является пятиточечный [5] алгоритм поиска матрицы  $E$ . Матрицы поворота  $R$  и смещения  $t$  получаются путем сингулярного разложения  $E$ .

Примем, что в начальный момент времени вращение и смещение отсутствуют, таким образом, матрица  $R_0$  является единичной матрицей  $3 \times 3$ , а  $t_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ . Перемещение камеры между кадрами записывается как  $R_i = R \cdot R_{i-1}$ ,  $t_i = t_{i-1} + R \cdot t$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Тестирование визуальной одометрии с использованием FAST и ORB проводилось на наборе данных «KITTI odometry dataset». Набор данных представляет собой последовательность изображений, снятых с камеры, закрепленной на автомобиле.

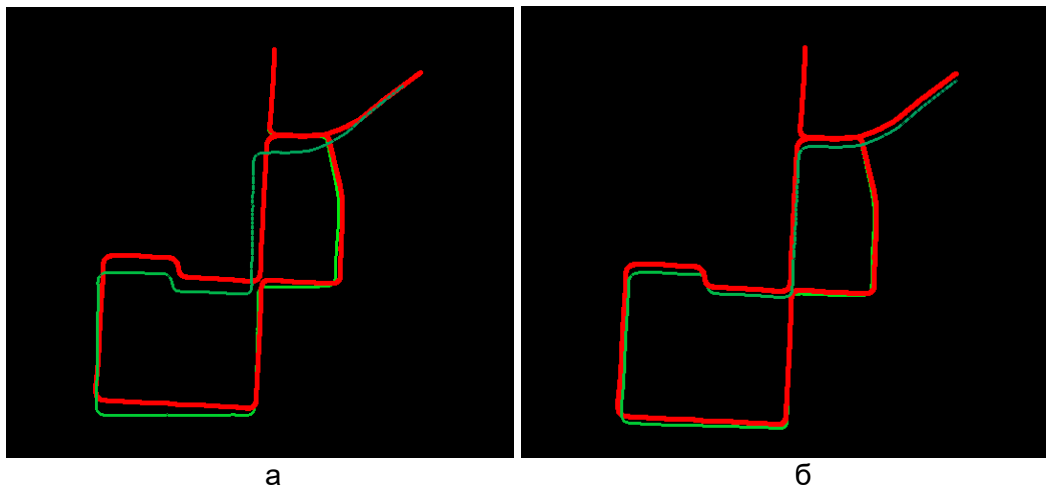


Рис. 2. Красным цветом обозначена истинная траектория, зеленым – траектория на основе визуальной одометрии с использованием сочетаний ORB/brute-force matcher (а) и FAST/KLT tracker (б)

Как можно видеть сочетание алгоритмов FAST и KLT дает более точную оценку траектории рис. 2, однако со временем ошибка неизбежно накапливается, что ведет к серьезному отклонению от истинной траектории. Еще одна проблема возникает, когда не наблюдается ни одной ключевой точки, например, в какой-то момент времени камера была закрыта препятствием или движение было слишком быстрым, и кадр оказался размытым. Такие нарушения препятствуют продолжению работы простейшего алгоритма визуальной одометрии, поэтому возникает необходимость реинициализации. Вышеуказанные проблемы решаются представлением позиций камеры в виде иерархической системы графов, где вершины хранят информацию о кадре, в том числе ключевые точки, которые также служат набором визуальных слов, на основе которого можно произвести повторную инициализацию. Ребра графа представляют перемещение камеры. Для решения задачи повторной инициализации можно прибегнуть к методу bag-of-visual-words, описанному в [1].

За основу для полноценного SLAM был взят алгоритм визуальной одометрии на основе ключевых точек ORB, так как репрезентация ключевых точек BRIEF наиболее удобна для метода bag-of-visual-words, а также для обеспечения эффективной фильтрации ложных соответствий. Алгоритм был дополнен локальной оптимизацией с целью устранения дрейфа по углу. Процесс картирования представлен на рис. 3.

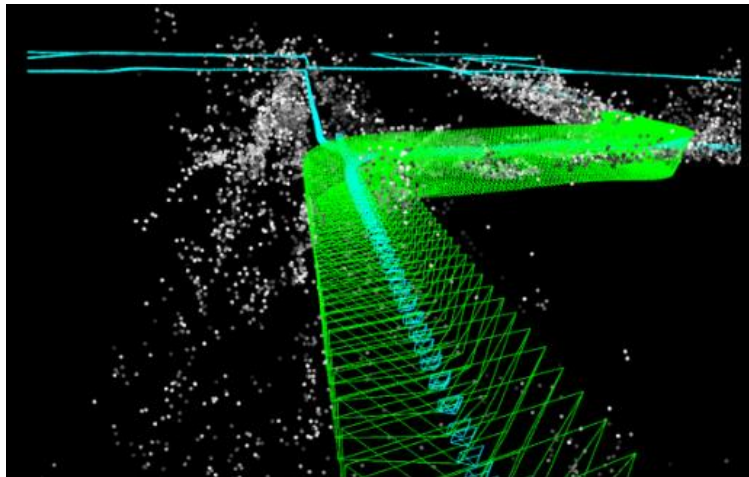


Рис. 3. Голубым цветом обозначена истинная траектория, зеленым – фрагмент траектории, построенной алгоритмом SLAM

Алгоритм монокулярного SLAM широко применим за рамками проекта с квадрокоптером Parrot ARDrone 2.0, поскольку для его работы необходима лишь одна откалиброванная камера. Визуальная одометрия может быть использована для коррекции информации о местоположении робота в случаях, когда другие датчики имеют значительную ошибку, которая накапливается с течением времени [6, 7]. Карта, полученная в результате работы алгоритма, является разреженной и не подходит для точных измерений, однако, позволяет составить общее представление о видимых препятствиях. В дальнейшем эта карта может быть конвертирована в структуру остонар [1], удобную для решения задач поиска пути.

### Литература

1. Galvez-López D. and Tardos J.D. Bags of Binary Words for Fast Place Recognition in Image Sequences // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2012. – V. 28. – № 5. – P. 1188–1197.
2. Tateno K., Tombari F., Laina I. and Navab N. CNN-SLAM: Real-time dense monocular slam with learned depth prediction [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/316075716\\_CNN-SLAM\\_Real-time\\_dense\\_monocular\\_SLAM\\_with\\_learned\\_depth\\_prediction](https://www.researchgate.net/publication/316075716_CNN-SLAM_Real-time_dense_monocular_SLAM_with_learned_depth_prediction), своб.
3. Rublee E., Rabaud V., Konolige K. and Bradski G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // *International Conference on Computer Vision*. – 2011. – P. 2564–2571.
4. Tomashi C. and Kanade T. Detection and tracking of point features // *International Journal of Computer Vision*. – 1991. – V. 9(3). – P. 137–154.
5. Li H. and Hartley R. Five-Point Motion Estimation Made Easy // *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. – 2006. – P. 630–633.
6. Hornung A., Wurm K.M., Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. OctoMap: an Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees // *Autonomous Robots*. – 2013. – V. 34. – № 3. – P. 189–206.
7. Rosten E. and Drummond T. Fusing points and lines for high performance tracking // *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05)*. – 2005. – V. 2. – P. 1508–1515.

**Павлова Марина Владимировна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р41301Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: mar.pavlova2018@yandex.ru

**Послянова Ольга Николаевна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р41301Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: posljanova@yandex.ru

**Юльметова Ольга Сергеевна**

Год рождения: 1984

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», с.н.с.

e-mail: olga@yulmetova.ru

**УДК 629.7****ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ  
ПРОВОДИМОСТИ РОТОРА ШАРОВОГО ГИРОСКОПА****Павлова М.В.** (Университет ИТМО), **Послянова О.Н.** (Университет ИТМО)**Научный руководитель – к.т.н. Юльметова О.С.**

(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

В работе объектом исследования выступает ротор электростатического гироскопа, при изготовлении которого предъявляются повышенные требования к оптическим, геометрическим и электрофизическим параметрам. Существующая технология изготовления ротора на финишных операциях связана с напылением пленки нитрида титана TiN и нанесением оптического изображения методом лазерного маркирования. Данная технология не обеспечивает однородность электрофизических свойств поверхности ротора, что негативно сказывается на его динамике в электростатическом подвесе. Для обеспечения однородности поверхностной проводимости предложено напылять на финишную поверхность узла тонкопленочное хромовое покрытие.

**Ключевые слова:** ротор шарового гироскопа, тонкопленочное покрытие, электростатический гироскоп, контрастность изображения, геометрия поверхности.

Точность работы гироскопов с неконтактным подвесом чувствительного элемента напрямую зависит от метода и качества изготовления сферического узла. Чувствительный элемент шарового электростатического гироскопа должен соответствовать повышенным требованиям, предъявляемым к геометрии и дисбалансам [1]. На данный момент перспективным требованием, предъявляемым к сферическому узлу, является однородность поверхностной проводимости. Технология изготовления ротора электростатического гироскопа включает в себя ряд этапов [2, 3]:

1. изготовление сферической заготовки из бериллия;
2. формирование момента инерции, балансировка и сферодоводка;
3. напыление износостойкого покрытия нитрида титана методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ);
4. финишная операция – нанесение оптического изображения методом лазерной маркировки.

Однако в результате формирования оптического изображения на поверхности нитрида титана образуется оксид титана. Следовательно, поверхность сферического узла имеет разную электропроводность, что негативно влияет на динамику ротора при его вращении в электростатическом подвесе.

В связи с этим было предложено исследовать возможность напыления тонкопленочного хромового покрытия на финишную поверхность сферического узла, что и являлось целью настоящего исследования.

Предварительные эксперименты показали, что с ростом толщины хромового покрытия ухудшается контрастность оптического рисунка. В связи с этим возникла необходимость исследовать и разработать режим не только для напыления покрытия, но и для нанесения оптического рисунка методом лазерной маркировки [4]. В основе разрабатываемого режима формирования оптического рисунка с повышенной величиной контрастности использовалась уже имеющаяся технология, обеспечивающая контрастность в пределах  $0,4 \pm 0,05$  на длине волны 860–890 нм (табл. 1).

Таблица 1. Режимы маркирования ротора

Мощность $P$ , %	Скорость $V$ , мм/с	Частота $f$ , кГц	Длительность импульса $\tau$ , нс	Плотность заливки $N$ , лин/мм	Число проходов $Q$	Температура лазера $T$ , °С
25	85	99	4	250	4–7	32

Данный режим основан на применении многопроходной лазерной обработки с целью постепенного усиления контрастности [5]. Для увеличения оптического контраста было предложено увеличить количество проходов лазера с 4-х до 7-ми.

Режим для напыления хрома на финишную поверхность чувствительного элемента был выявлен в ходе экспериментально-исследовательских работ и обеспечил хорошую адгезию к поверхности (табл. 2). Толщина покрытия хрома составила 10 нм, а удельное электрическое сопротивление –  $14 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

Таблица 2. Режимы напыления пленки хрома методом КИБ

Время напыления $t$ , с	40
Напряжение смещения $U$ , В	150
Вакуум в камере $P_{\text{вак}}$ , мм рт.ст.	$1 \cdot 10^{-4}$
Ток дуги $I$ , А	80

Чтобы оценить возможность дальнейшего применения режимов многопроходной лазерной обработки для формирования рисунка, потребовалась оценка контрастности поверхности ротора по карте отражения (рис. 1).

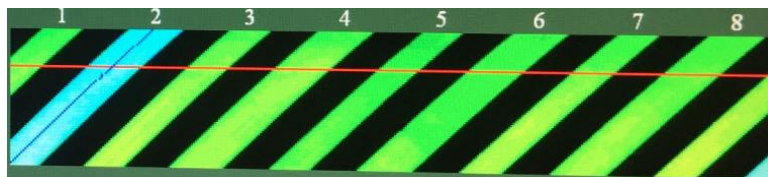


Рис. 1. Карта отражения ротора

Карта отражения выявила увеличение контрастности с увеличением числа проходов лазера (табл. 3).



Таблица 3. Изменение контрастности оптического рисунка

Количество проходов	4	5	6	7
Контрастность	0,4–0,41	0,45–0,48	0,49–0,50	0,50–0,51

Однако, проанализировав снимки, полученные на электронном микроскопе, было выявлено, что с увеличением числа проходов наблюдается прожиг покрытия нитрида титана (рис. 2), что приводит к изменению геометрии ротора, о чем свидетельствует полученная круглограмма (рис. 3).

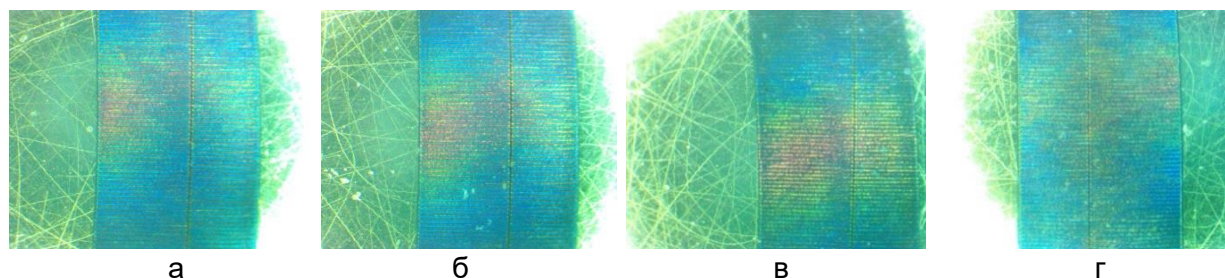


Рис. 2. Оптические изображения лазерного рисунка: при 4-х проходах лазера (а); при 5-и проходах лазера (б); при 6-и проходах лазера (в); при 7-и проходах лазера (г)

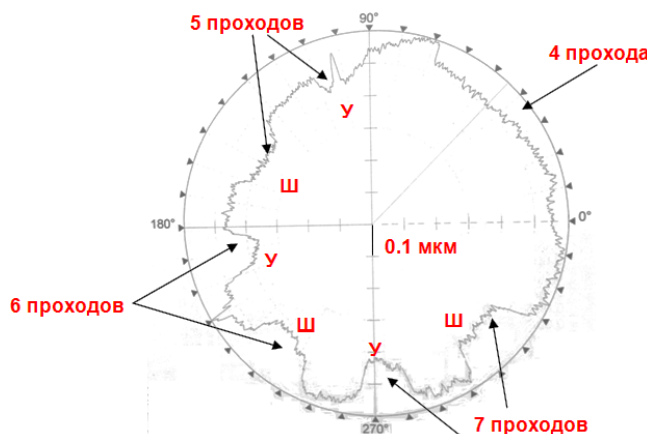


Рис. 3. Круглограмма ротора: У – узкая и Ш – широкая полосы

Представленная круглограмма иллюстрирует появление ступенчатого микрорельефа, образующегося в результате прожига поверхности ротора, начиная с 5-ти проходов лазерной обработки. Данный факт говорит о том, что повысить контрастность без ухудшения формы поверхности ротора на данный момент не представляется возможным. В связи с чем в дальнейших исследованиях использовался только 4-х проходной метод лазерной обработки (табл. 4).

Таблица 4. Режимы маркирования ротора

Мощность $P$ , %	Скорость $V$ , мм/с	Частота $f$ , кГц	Длительность импульса $\tau$ , нс	Плотность заливки $N$ , лин/мм	Число проходов $Q$	Температура лазера $T$ , °С
25	85	99	4	250	4	32

Ротор, контрастное изображение (табл. 4) и финишное хромовое покрытие (табл. 2) на котором выполнялось с помощью выявленных режимов, был помещен в гермоконтейнер, где было зафиксировано незначительное улучшение динамики вращения ротора в процессе пуска в электростатическом подвесе. Так как известно, что хромовое покрытие не ухудшает форму поверхности, а плавно повторяет ее рельеф, и, предполагается, что при увеличении толщины хромового покрытия удастся получить однородное удельное сопротивление на всей поверхности ротора, было принято решение постепенно увеличивать время напыления хрома на ротор. Максимальное значение длительности напыления составило 120 с (табл. 5).

Таблица 5. Режимы напыления пленки хрома методом КИБ

Время напыления $t$ , с	120
Напряжение смещения $U$ , В	150
Вакуум в камере $P_{\text{вак}}$ , мм рт.ст.	$1 \cdot 10^{-4}$
Ток дуги $I$ , А	80

В результате использования режима (табл. 5) толщина хромовой пленки на поверхности ротора составила 14 нм, а удельное сопротивление снизилось на порядок и составило  $1,6 \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

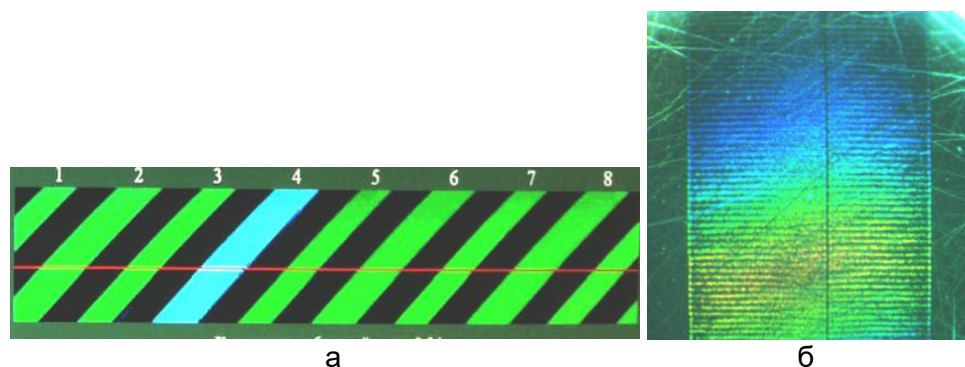


Рис. 4. Карта отражения ротора (а); оптические изображения лазерного рисунка (б)

Карта отражения (рис. 4, а) показала, что контрастность изображения уменьшилась и составила 0,3, однако, снимок поверхности ротора выявил, что видимость оптического изображения сохранилась (рис. 4, б).

**Заключение.** В ходе настоящего исследования была разработана технология напыления хрома методом КИБ, позволяющая получить тонкопленочное хромовое покрытие с хорошей адгезией и толщиной порядка 14 нм. Выявлено, что увеличение длительности напыления уменьшает удельное электрическое сопротивление тонкопленочного хромового покрытия на порядок. Установлено, что повышение контрастности оптического изображения за счет увеличения числа проходов приводит к прожигу и формированию ступенчатого микрорельефа на поверхности сферического узла.

### Литература

1. Юльметова О.С. Формализация концептуальной модели процесса повышения точности электростатического гироскопа // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2018. – № 2. – С. 132–138.
2. Юльметова О.С., Щербак А.Г., Буцык А.Я., Ландау Б.Е, Вейко В.П., Валетов В.А. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / Пат. RU 2498224; заявл. 05.06.12; опубл 10.11.13.
3. Карпов Ю.И., Чижмаков М.Б. Особенности формирования покрытий Ti(N,C) на твердосплавных пластинах // *Вестник машиностроения.* – 1992. – № 3. – С. 18–21.
4. Юльметова О.С., Щербак А.Г., Вейко В.П., Юльметова Р.Ф., Щербак С.А. Управление контрастностью растрового рисунка при лазерной маркировке: моделирование технологического процесса // *Изв. вузов. Приборостроение.* – 2015. – № 6(58). – С. 485–491.
5. Yulmetova O.S., Yulmetova R.R., Matyzhonok V.N. Research on the contrast of laser marks on precise surfaces of metal // *Proceedings of SPIE.* – 2011. – V. 7996. – P. 799604.

**Плешков Андрей Александрович**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41775Направление подготовки: 12.04.01 – Приборостроение

e-mail: and-pleshkov-1996@yandex.ru

**Помпеев Кирилл Павлович**

Год рождения: 1965

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: kir-pom@mail.ru

УДК 004.422.8: 658.512.4

**К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРНЫХ СХЕМ  
И РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ****Плешков А.А., Помпеев К.П.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Помпеев К.П.**

Работа посвящена вопросу автоматизации размерно-точностного анализа технологических процессов изготовления деталей. Размерно-точностный анализ технологических процессов заключается в составлении размерных схем, выявлении и расчете технологических размерных цепей для определения всех операционных размеров. В работе дано описание разработанной программы расчета линейных технологических размеров, а также представлен план работ по разработке модуля синтеза линейных размерных схем.

**Ключевые слова:** размерно-точностной анализ, размерные цепи, размерные схемы, автоматизация, технологический процесс, автоматизированное проектирование, операционные размеры.

Проведение размерно-точностного анализа технологических процессов изготовления деталей является важным и достаточно трудоемким этапом проектирования. Проведение размерно-точностного анализа технологических процессов (РТА ТП) заключается в составлении размерных схем, выявлении и расчете технологических размерных цепей для определения всех операционных размеров.

Строка39 Файл: CHAIN.DAT Выход:Esc Вверх/вниз : ↑ ↓ PGUP PGDN HOME END  
5-Проведено округление технологического размера

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ

Значение технолог. размера	Отклонение верхнее нижнее	Поле допуска		Анализ	Запас по допуску	Значение конструктор размера или припуска	Отклонение верхнее нижнее
		эк-ки допуст	вычисл				
t2 =30.000	-.000 -.210	.210	.210	0	+ .000	k1 =30.000	.000 -.210
t1 =20.000	-.210 .000	.210	.210	0	+ .000	k2 =20.000	.210 .000
t3 =31.400	-.310 -.310	.620	.620	5	+ .000	z1 = 1.400	.520 -.310

Рис. 1. Вывод результатов расчета в системе «ТИС-Цепь»

В 1990-х годах на кафедре технологии приборостроения Университета ИТМО была разработана программа «ТИС-Цепь» (рис. 1), с помощью которой можно выполнять расчет технологических размерных цепей. Программа, написанная на языке программирования Fortran, обладает рядом существенных недостатков, которые в совокупности не позволяют использовать «ТИС-Цепь» на производстве. К основным недостаткам данной программы относятся следующие:

- не предусмотрено использование несоосностей в качестве замыкающих звеньев (можно использовать только конструкторские размеры и припуски на обработку);
- отсутствует возможность ужесточения значения допуска какого-либо известного (уже рассчитанного) технологического размера, вместо чего приходится ужесточать конструкторские размеры;
- отсутствует функционал автоматического определения номера качества;
- несовременный и неудобный для пользователя интерфейс, что снижает скорость работы с программой;
- для запуска программы на современных персональных компьютерах необходимо использовать DOS-эмулятор.

Функциональные возможности современных отечественных и зарубежных систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) расширяются с каждым годом, однако, до сих пор проблеме автоматизации РТА ТП не уделяется достаточного внимания. Решение данной проблемы позволит значительно сократить сроки и материальные затраты на внедрение спроектированных технологий изготовления изделий в производство, поскольку эти технологии будут надежными с точки зрения обеспечения точности [1].

В разрабатываемой системе автоматизированного проведения РТА ТП подразумевается наличие двух модулей: первый отвечает за синтез линейных размерных схем, второй позволяет проводить расчет линейных технологических размерных цепей. В настоящий момент второй модуль уже реализован.

Данная программа разработана в среде Microsoft Excel с использованием средств языка программирования Visual Basic for Applications. В основе расчетного блока лежит методика расчета линейных размерных технологических цепей [2], разработанная в Северо-Западном заочном техническом университете.

Программа позволяет облегчить работу технолога при расчете линейных размерных цепей, а, главное, значительно сократить срок выполнения расчетов. Это подтверждают результаты научно-исследовательской работы «Совершенствование технологической подготовки производства приборостроительного предприятия на основе методик построения и использования трехмерных моделей деталей», в рамках которой на предприятии ПАО «ТехПрибор» была апробирована программа расчета линейных размерных цепей. Ввод исходных данных и сам расчет в данной программе 47 размерных цепей, из которых 25 многозвенных, занял всего 2 ч. Ручной расчет в данном случае занял бы около 13 ч, учитывая, что в среднем на расчет многозвенной цепи требуется 0,5 ч. Это почти 2 рабочих дня.

На рис. 2 представлена часть одной из вкладок программы после выполнения расчета технологического размера размерной цепи, замыкающим звеном которой является конструкторский размер.

Для определения неизвестных операционных размеров требуется выявить размерные цепи и произвести их расчет. Для формирования размерных цепей необходимо построить размерную схему технологического процесса, которая достаточно наглядно отображает динамику изменения и взаимосвязи размеров на различных этапах обработки заготовки. Размерные схемы позволяют вскрыть размерные связи в проектируемом технологическом процессе, т.е. дают возможность сформировать технологические размерные цепи [3].

Размерная цепь (K9 = -T5+T10)					
Замыкающий конструкторский размер	Искомый составляющий технологический размер	Известный составляющий технологический размер	Известный составляющий технологический размер	Известный составляющий технологический размер	Известный составляющий технологический размер
<b>K<sub>9</sub> = + T<sub>10</sub> - T<sub>5</sub></b>					
Искомый составляющий технологический размер		Замыкающий конструкторский размер		Известный составляющий технологический размер	
T <sub>10</sub> - увеличивающий		K <sub>9</sub> = 10 мм		T <sub>5</sub> - уменьшающий	
Расчетные значения		BO K <sub>9</sub> = 0.18 мм		T <sub>5</sub> = 15 мм	
IT T <sub>10</sub> = 0.18 мм (кавалитет: 11...12)		HO K <sub>9</sub> = -0.18 мм		BO T <sub>5</sub> = 0.09 мм <small>Для уточнения BO заменить значение</small>	
T <sub>10</sub> <sup>CP</sup> = 25 мм		IT K <sub>CP</sub> = 0.36 мм (кавалитет: 14)		HO T <sub>5</sub> = -0.09 мм <small>Для уточнения HO заменить значение</small>	
T <sub>10</sub> = 25 ± 0.09 мм		K <sub>9</sub> <sup>CP</sup> = 10 мм		(кавалитет: 12)	
T <sub>10</sub> <sup>роч. min</sup> = 24.91 мм		K <sub>9</sub> <sup>min</sup> = 9.82 мм		T <sub>5</sub> <sup>CP</sup> = 15 мм	
T <sub>10</sub> <sup>роч. max</sup> = 25.09 мм		K <sub>9</sub> <sup>max</sup> = 10.18 мм		T <sub>5</sub> <sup>min</sup> = 14.91 мм	
Принятое значение искомого				T <sub>5</sub> <sup>max</sup> = 15.09 мм	

Рис. 2. Часть вкладки «K9» после выполнения расчета размера T9

При проведении размерно-точностного анализа ТП для деталей типа корпусов, кронштейнов, рычагов, плит и других деталей, не являющихся телами вращения, необходимо выполнить построение размерных схем ТП по линейным размерам в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (в каждой координатной плоскости строится отдельная размерная схема) [4].

Разрабатываемый модуль синтеза линейных размерных схем в качестве входных данных должен принимать трехмерную модель детали, переданную из САД-системы в формате STEP. Далее выполняется интерпретация данных о модели детали путем последовательного прохода по секции DATA STEP-файла, после чего программа формирует упрощенный эскиз детали. Затем в интерактивном режиме проводится построение необходимых размерных схем в виде графов, на основе которых выявляются технологические размерные цепи. Они являются выходными данными модуля синтеза и в виде матрицы экспортируются в уже разработанный модуль расчета линейных размерных цепей, для которого эти данные являются входными.

На данный момент в расчетном модуле информация о замыкающих и составляющих звеньях цепей вводится вручную в матрицу линейных размерных цепей (рис. 3), на основе которой генерируются вкладки для расчета каждой размерной цепи.

Технологический размер не входит в размерную цепь: "пусто" или 0  
 Технологический размер является увеличивающим звеном цепи (входит в размерную цепь со знаком "+"): 1  
 Технологический размер является уменьшающим звеном цепи (входит в размерную цепь со знаком "-"): -1

	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6	T 7	T 8	T 9	T 10	T 11	T 12	T 13	T 14	T 15
8 K 1				1			-1			1					
1 K 2													1		
2 K 3														1	
6 K 4								1							-1
3 K 5								1							
4 K 6									1						
7 K 7								-1		1					
5 K 8											1				
15 Z 1	1			-1	-1										
14 Z 2		1		-1											
11 Z 3						1				-1	1				
9 Z 4							1		-1						
12 Z 5				1		-1									
10 Z 6								1		-1					
13 Z 7			1	1			-1								

Рис. 3. Часть вкладки «Матрица» после ввода исходных данных и генерации вкладок

На первоначальном этапе планируется, что модуль синтеза размерных схем будет экспортировать данные в расчетный модуль не напрямую, а через текстовый файл в формате CSV (Comma-Separated Values – значения, разделенные запятыми), который предназначен для отображения табличных данных. MS Excel может импортировать данные из файла в формате CSV и представить их в табличном виде, удобном пользователю.

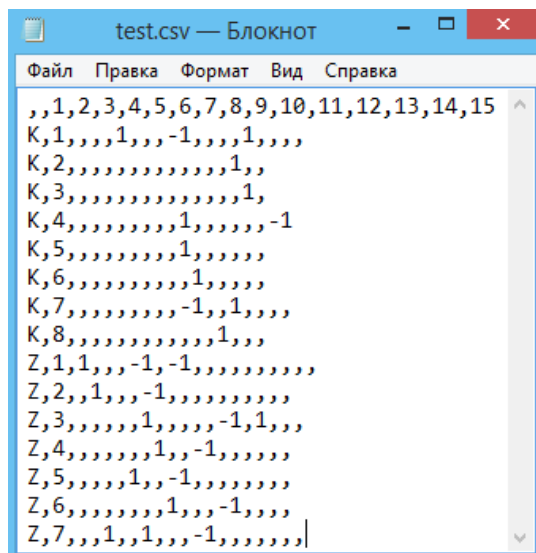


Рис. 4. Пример CSV-файла с данными о размерных цепях

На рис. 4 представлен пример файла в формате CSV, в котором содержится информация, необходимая для автоматического заполнения матрицы. Первая строка файла содержит заголовки столбцов – номера технологических размеров. Остальные строки (их количество определяет количество технологических размеров) содержат следующую информацию:

- обозначение замыкающего звена (К – конструкторский размер, Z – припуск, е – несоосность);
- номер замыкающего звена;
- значения функции каждого технологического размера.

После ввода в расчетный модуль данных о размерных цепях пользователь определяет и указывает порядок их расчета для последующей генерации расчетных вкладок. Пример одной из них был представлен выше (рис. 2). После выполнения расчетов результаты автоматически заносятся в сводный лист, который представлен на рис. 5.

Величины конструкторских размеров, припусков и несоосностей				Величины расчетных технологических размеров				
№ п.п.	Обознач. и № замык. звена	Номинал	+/- Знач. ВО		Обознач. и № технол. р-ра	Номинал	+/- Знач. ВО	
			-/+	Знач. НО			-/+	Знач. НО
1	К 1 =	1	+ 0.2	-0.2	Т 1 =	90	+ 0.3	-0.3
2	К 2 =	12	+ 0.43	-0.43	Т 2 =	11	+ 0.3	-0.3
3	К 3 =	15	+ 0.43	-0.43	Т 3 =	101	+ 0.4	-0.4

Рис. 5. Части «Сводного листа»: замыкающие звенья (а); составляющие звенья (б)

Программа имеет потенциал для дальнейшего усовершенствования. Например, на данный момент остается неавтоматизированным ввод параметров, определяющих минимальный расчетный припуск. Решение этой задачи требует тщательного анализа,

поскольку для автоматизации определения значений составляющих элементов припуска требуются дополнительные входные параметры, такие как материал и вид заготовки, метод механической обработки, при котором формируется припуск, и т.д.

Кроме того, планируется внести изменения в модуль формирования сводного листа. На данный момент в нем отражаются исходные (номинальные значения конструкторских размеров и их предельные отклонения) и выходные (рассчитанные технологические размеры, фактические значения припусков и несоосностей, а также их отклонения) данные. Изменения предполагают, что для каждого размера дополнительно будет выводиться номер качества, который определяется автоматически. Также необходимо расширить функционал модуля печати сводного листа.

Кроме того, немало важными задачами являются оптимизация программного кода и разработка инструкции для пользователя.

Таким образом, использование предлагаемой системы автоматизированного проведения РТА ТП позволит повысить качество проектирования ТП изготовления деталей за счет обеспечения надежности спроектированных технологий по параметрам точности, значительно сократить сроки и материальные затраты на проектирование и внедрение ТП в производство.

### **Литература**

1. Помпеев К.П. Размерно-точностной анализ при автоматизированном проектировании надежных технологий // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 600–609.
2. Вороненко А.Е. Основы технологии машиностроения: учебно-методический комплекс. – СПб.: СЗТУ, 2010. – 265 с.
3. Безматерных О.А., Беседина А.А. Курсовое и дипломное проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие. – Пермь: ПАТ, 2013. – 250 с.
4. Валетов В.А., Помпеев К.П. Технология приборостроения. Учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 234 с.



**Поволоцкий Ярослав Александрович**

Год рождения: 1998

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R3475

Направление подготовки: 09.03.01 – Информатика и вычислительная техника

e-mail: yara\_nik@mail.ru



**Афанасьев Максим Яковлевич**

Год рождения: 1986

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: amax@niuitmo.ru

УДК 681.518.5

**РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ  
АВТОМАТИЗАЦИИ НА БАЗЕ ПРОТОКОЛА MODBUS/TCP**

**Поволоцкий Я.А.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Афанасьев М.Я.**

В работе рассмотрены возможности разработки распределенной системы промышленной автоматизации. Проведен сравнительный анализ централизованных и децентрализованных систем промышленной автоматизации. Описаны компоненты распределенной системы промышленной автоматизации.

**Ключевые слова:** промышленная автоматизация, распределенные системы, киберфизические системы, система управления.

**Введение.** В настоящее время популяризируется применение киберфизических систем (КФС). КФС – это сложная распределенная система, подразумевающая тесную интеграцию вычислительных средств в физические процессы. В такой системе все элементы взаимодействуют друг с другом с помощью стандартных интернет-протоколов [1–3]. Использование оборудования, функционирующее на базе единого, стандартного протокола и не имеющего привязки к единому центру – путь к созданию индустриальной киберфизической системы. В соответствии с вышесказанным определены следующие задачи:

- провести сравнительный анализ централизованных и децентрализованных систем промышленной автоматизации;
- описать компоненты распределенной системы промышленной автоматизации.

**Сравнительный анализ централизованных и децентрализованных систем промышленной автоматизации.** В качестве примера были рассмотрены архитектуры SCADA-систем. SCADA – это программный продукт, предназначенный для управления и сбора данных в режиме реального времени. Как правило, SCADA-системы являются частью автоматизированной системы управления технологическим процессом. Для понимания функционирования данной системы необходимо рассмотреть ее концепцию. Для примера представим систему охлаждения воды. В такой системе информация с датчиков (измерительных приборов) собирается программируемыми логическими контроллерами (ПЛК). Далее полученная информация обрабатывается и передается оператору через



человеко-машинный интерфейс. Оператор получает информацию и принимает контролирующее решение – изменить режим работы охлаждения или оставить в текущем состоянии. Таким образом, можно выделить задачи, которые решают SCADA-системы:

- сбор и обмен информации;
- обработка информации;
- отображение информации для оператора;
- самостоятельное управление в аварийных ситуациях.

В данном примере была рассмотрена автономная архитектура SCADA-систем. Данная система удобна своей простотой и легкостью организации, но и имеет недостатки в виде низкой отказоустойчивости и обеспечении истинности данных. В современном мире системы обязаны иметь свойство удаленности, которого нет у автономной архитектуры. Для организации данного свойства была разработана клиент-серверная архитектура. Данная архитектура имеет все свойства автономной, только теперь система находится на сервере, а операторы используют клиентские станции для работы. Из-за использования принципа резервирования проблема с отказоустойчивостью решилась, но проблема обеспечения истинности данных осталась. Для решения проблем клиент-серверной архитектура была разработана распределенная архитектура. Главным плюсом данной архитектуры является уход от централизованного управления. Из-за этого решения все вычисления выполняются на несколько взаимосвязанных вычислительных устройствах с функцией взаимного резервирования. Все изменения, которые происходят в системе, известны всем участникам этой системы, следовательно, система использует единую базу данных.

Применяя распределенную архитектуру, удастся создать систему, которая отвечает принципам КФС и выполняет ее требования:

- высокая отказоустойчивость и безопасность;
- возможность удаленного управления/мониторинга/изменения;
- единая база данных;
- отсутствие привязки к главному центру;
- единые возможности для всех устройств системы.

**Описание компонентов системы промышленной автоматизации.** Для создания системы промышленной автоматизации необходимы как программные, так и физические средства. В таких системах большинство управляющих действий выполняются автоматически при помощи ПЛК. ПЛК приобрели свою популярность в промышленности из-за своей автономности и надежности. ПЛК является самостоятельным устройством, ориентированным на работы с машинами через развитый ввод сигналов датчиков и вывод на исполнительные механизмы. Для организации связи между ПЛК и другими участниками системы используется протокол Modbus. Протокол Modbus был разработан компанией Modicon, которая сейчас является частью компании Schneider Electric, специально для использования в ПЛК. Использование единого протокола для организации связи между всеми участниками системы один из принципов КФС. ПЛК получает информацию с датчиков при помощи протокола Modbus, далее обрабатывает ее и передает в систему. Таким образом, можно сказать, что ПЛК является единой физической единицей для организации системы промышленной автоматизации. Кроме физической составляющей необходима программная среда, которая позволит организовать связь между всеми устройствами системы. Комплекс программ от компании Schneider Electric позволяет настроить работу системы так, как это требует производство.

**Заключение.** Результатами выполнения работы являются: сравнительный анализ централизованных и децентрализованных систем промышленной автоматизации; выявление необходимой архитектуры для соблюдения принципов и требований КФС; описание компонентов системы промышленной автоматизации.

**Литература**

1. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. проф. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
2. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kipshop.ru/CoDeSys/steps/codesys\\_v23\\_ru.pdf](http://www.kipshop.ru/CoDeSys/steps/codesys_v23_ru.pdf), своб.
3. Petruzella F.D. Programmable logic controllers. – 4th ed. – New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 2011. – 416 p.

**Савенко Руслан Валерьевич**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р4230Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: russavenko@gmail.com

**Аксененко Виктор Дмитриевич**

Год рождения: 1947

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: office@eprib.ru

УДК 629.591

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОНОМНОЙ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО  
УКАЗАТЕЛЯ ГЛИССАДЫ****Савенко Р.В.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Аксененко В.Д.**

Работа выполнена в рамках темы НИР «Трехосная система гироскопической стабилизации оптического блока на волоконно-оптических гироскопах».

Для повышения эффективности морского флота используется морская авиация. Требуемый уровень безопасности, необходимый при посадке вертолетов, достигается за счет оснащения взлетно-посадочной площадки оптической системой посадки. Такие системы посадки состоят из ряда элементов, в том числе указателя глиссады. В работе рассмотрена автономная система трехосной гироскопической стабилизации указателя глиссады, работа которого не прекращается при прекращении поступления данных от бортовой навигационной системы.

**Ключевые слова:** оптические системы посадки, гиростабилизация, обеспечение автономности, указатель глиссады, морская авиация.

Для повышения эффективности морского флота используются самолеты и вертолеты, базирующиеся на палубах кораблей, что заметным образом расширяет спектр решаемых флотом задач. Для организации полетов вертолетов (как и самолетов) на авианесущих кораблях оборудуются взлетно-посадочные площадки (ВПП). Требуемый уровень безопасности, необходимый при посадке вертолетов, достигается за счет оснащения ВПП оптической системой посадки (ОСП). ОСП формирует ряд сигнальных огней определенного направления и цвета, обеспечивая пилота летательного аппарата информацией о его положении относительно ВПП.

Первые работы над оптическими системами посадки вертолетов начались в 1970-х годах [1]. Среди иностранных компаний следует упомянуть французскую CILAS [2], итальянскую Calzoni [3] и английскую Aeronautical & General Instruments Limited [4], немецкие LinksRechts [5] и Ortonaval [6]. Среди отечественных компаний в данном направлении работают ЗАО НТЦ «Альфа-М» [7] и АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [8].

Самые современные и надежные ОСП включают в себя указатель глиссады (УГ). Глиссада – это траектория полета летательного аппарата, по которой он снижается. Она

характеризуется углом наклона между плоскостью глиссады и плоскостью горизонта. УГ проецирует видимый телесный угол с тремя цветными информационными секторами: «выше глиссады» – желтый, «на глиссаде» – зеленый, «ниже глиссады» – красный. УГ установлен на качающемся корабле, поэтому для поддержания постоянного угла наклона глиссады нужна система стабилизации оптического излучателя. Стабилизация оптического блока УГ в горизонте происходит по данным, поступающим от бортовой навигационной системы.

Особенностью рассматриваемого глиссадного указателя является его автономность, т.е. возможность его исправной работы при прекращении поступления данных от бортовой навигационной системы. В таком режиме стабилизация оптического блока будет осуществляться по данным от комплекса встроенных инерциальных датчиков УГ.

Обеспечение автономности указателя глиссады в значительной степени повышает надежность работы оптической системы посадки, к которой предъявляются строгие требования, а также расширяет номенклатуру судов и кораблей для ее применения, в связи с этим проведение исследований в этой области является актуальным.

Цель работы заключалась в разработке и исследовании системы автономной трехосной гироскопической стабилизации оптического модуля указателя глиссады для посадки корабельных вертолетов.

На рис. 1 представлена структурная схема изучаемого указателя глиссады. Автономность глиссадного указателя достигается за счет включения в систему триады акселерометров и гироскопов. Первые закреплены на основании прибора, а вторые расположены на самой стабилизированной платформе. Данные от инерциальных датчиков обрабатываются центральным контроллером, который высчитывает необходимые углы поворота платформы для ее стабилизации в горизонте.

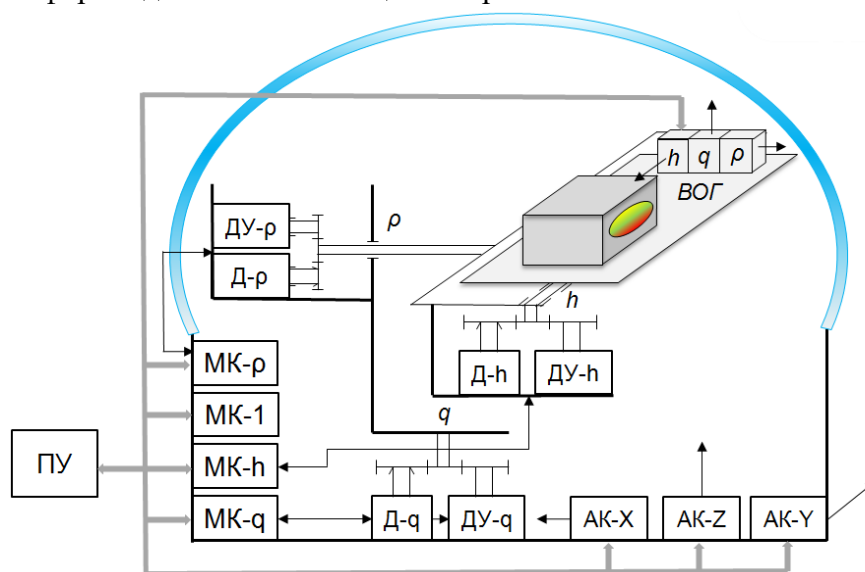


Рис. 1. Структурная схема изучаемого указателя глиссады

На схеме также отображены следующие основные элементы:

- оптический излучатель, установленный на стабилизируемой платформе;
- три датчика угла и двигателя, и управляющие ими контроллеры приводов;
- пульт управления оптической системы посадки;
- центральный контроллер, отвечающий за вычисление углов поворота платформы, по данным от гироскопов, акселерометров и датчиков угла.

В штатном режиме, когда данные от бортовой навигационной системы поступают в прибор, для стабилизации оптического блока используются эти данные (параметры ориентации) и показания установленных на платформе гироскопов. Такое построение систем стабилизации широко распространено и является классическим [9, 10].

В обычных схемах построения трехосных гиросtabilизаторов гироскопы и акселерометры установлены на самой платформе. В качестве примера можно привести системы гиросtabilизации из [11]. Одна из возможных схем трехосного гиросtabilизатора на трех двухстепенных гироскопах приведена на рис. 2.

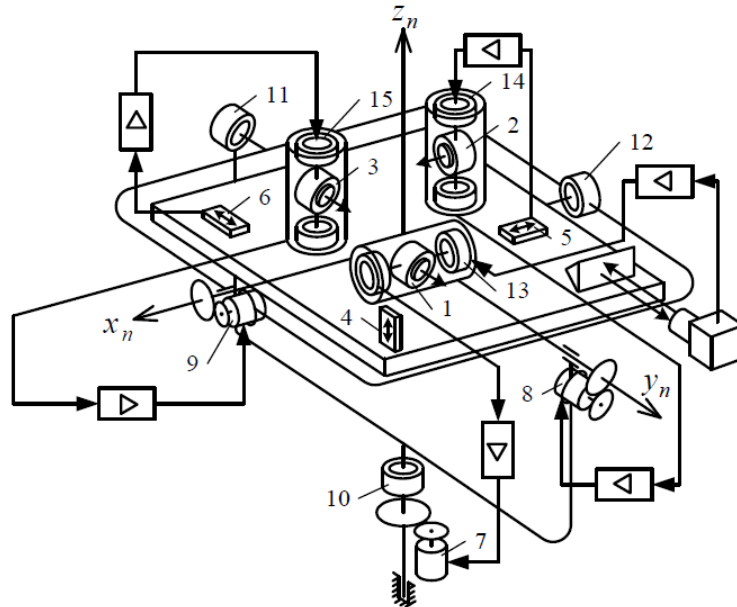


Рис. 2. Структурная схема трехосного гиросtabilизатора с тремя датчиками угловой скорости

Стабилизированная платформа устанавливается в кардановом подвесе, состоящем из внутренней и наружной рам, обеспечивая платформе три степени свободы относительно основания. На платформе располагается объект стабилизации, и акселерометры 4–6 инерциальной навигационной системы и три двухстепенных гироскопа. Каждый из гироскопов снабжен датчиком угла прецессии и датчиком моментов. По осям карданова подвеса – осям стабилизации – устанавливаются стабилизирующие двигатели, управляемые через усилители сигналами с датчиков углов прецессии. Таким образом, трехосный гиросtabilизатор имеет систему стабилизации, состоящую из трех каналов, каждый из которых осуществляет стабилизацию платформы относительно одной из осей. Например, гироскоп 1 совместно со стабилизирующим двигателем 7 стабилизирует платформу относительно оси наружной рамы. Пусть к платформе приложен возмущающий момент по наружной оси подвеса. Этот момент вызывает поворот гироскопа 1 вокруг оси прецессии. С датчика угла гироскопа снимается сигнал, который после усиления и преобразования в усилителе поступает на управляющую обмотку двигателя стабилизации 7. Последний прикладывает к платформе момент, противоположный внешнему, компенсируя тем самым его воздействие на платформу [11].

Работа системы стабилизации УГ осуществляется в нескольких системах координат. Поэтому необходимо описать эти системы координат, какие углы поворотов их связывают, и вывести матрицы направляющих косинусов для преобразования измерений.

Для работы системы гиросtabilизации необходимо привести имеющиеся инерциальные датчики в оси стабилизируемой платформы ( $\xi_2$ ,  $\eta_2$ ,  $\zeta_2$ ) (рис. 3). Так как волоконно-оптические гироскопы уже находятся на платформе – для них преобразований не требуется.

Акселерометры находятся в основании прибора и жестко связаны с корпусом корабля. Чтобы привести их показания в оси платформы, необходимы текущие углы поворота платформы относительно основания прибора.

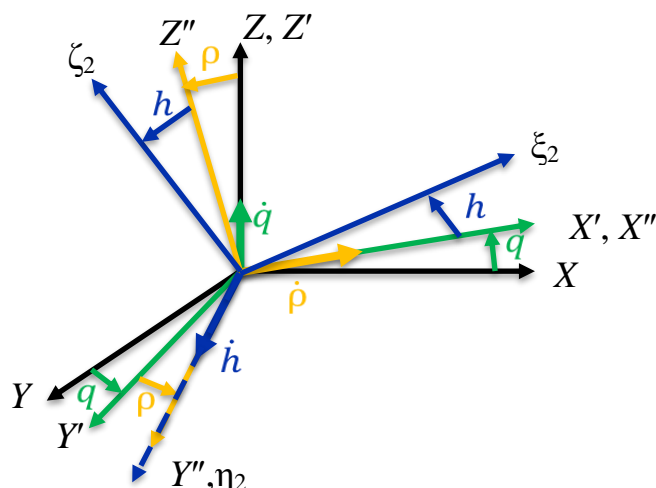


Рис. 3. Углы между осями, связанными с основанием прибора (X, Y, Z) и осями стабилизируемой платформы ( $\xi_2, \eta_2, \zeta_2$ )

Зная порядок поворотов платформы, и используя значения углов вращения от датчиков угла, можно рассчитать матрицу направляющих косинусов для пересчета измерений ускорений из осей, связанных с основанием прибора (X, Y, Z), в оси стабилизируемой платформы ( $\xi_2, \eta_2, \zeta_2$ ) [9]. Рассчитанная матрица представлена ниже:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos(h)\cos(q) - \cos(h)\sin(q) + & \sin(h)\cos(\rho) \\ -\sin(h)\sin(\rho)\sin(q) + \sin(h)\sin(\rho)\cos(q) & \\ -\cos(\rho)\sin(q) & \cos(\rho)\cos(q) & -\sin(\rho) \\ \sin(h)\cos(q) + & \sin(h)\cos(q) - & -\cos(h)\cos(\rho) \\ +\cos(h)\sin(\rho)\sin(q) & -\cos(h)\sin(\rho)\cos(q) & \end{bmatrix}.$$

Используя матрицу направляющих косинусов, выведены выражения для проекции сигналов трех акселерометров на горизонтальные оси  $\xi_2\eta_2$ , вокруг которых должно осуществляться построение инерциальной гиросвертикали.

Приведенные структурная схема указателя глиссады, алгоритм платформенной системы стабилизации, системы координат и формулы для преобразования изначальных измерений в горизонтальные оси позволяют приступить к разработке модели работы изучаемой системы гиросtabilизации.

### Литература

1. Technical report: NAVTRATQUIPCEN IH-265 / Computer Laboratory Naval Training Equipment Center / Computer simulation of fresnel lens optical landing system. – Orlando, Florida, 1977. – 44 p.
2. Cilas Helicopter Visual Landing Aid System Safecopter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cilas.com/en/glide-clope-indicator-helicopter-visual-landing-aids>, своб.
3. PRODUCTS & SERVICES [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.calzoni.com/products-services>, своб.
4. Naval Aviation Lighting overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agiltd.co.uk/Naval-Products/Visual-Landing-Aids>, своб.
5. LINKSrechts Helicopter Visual Landing Aid Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.linkrechts.de/index.html>, своб.
6. Optonaval Helicopter Visual Landing Aid (HVLA) Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.optonaval.de/products/hvla.html>, своб.

7. АО «Научно-технический центр «Альфа-М» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alpha-m.su/index.html>, своб.
8. Системы предполетной подготовки и обеспечения безопасной посадки летательных аппаратов на палубу корабля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.elektropribor.spb.ru/prod/new\\_vert](http://www.elektropribor.spb.ru/prod/new_vert), своб.
9. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
10. Ривкин С.С. Теория гироскопических устройств. Ч. 2. – Л.: Судостроение, 1964. – 548 с.
11. Лысов А.Н., Лысова А.А. Теория гироскопических стабилизаторов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 117 с.



**Слукина Марина Игоревна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41302;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: slukinamarina@gmail.com



**Литвиненко Юлия Александровна**

Год рождения: 1974

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н.;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

e-mail: julia\_lit@rambler.ru

УДК 531.383.001.4

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ  
ДВУХСТЕПЕННОГО ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ  
ФИЛЬТРАЦИИ**

**Слукина М.И.** (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

**Научный руководитель – к.т.н. Литвиненко Ю.А.**

(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Рассмотрена задача идентификации параметров модели ухода гироскопа на базе алгоритмов нелинейной фильтрации. Приведены результаты моделирования методического примера, которые сравниваются с результатами, полученными при решении задачи идентификации на основе алгоритмов обобщенного фильтра Калмана.

**Ключевые слова:** идентификация, фильтрация, модель погрешности, фильтр Калмана, уход гироскопа.

**Введение.** При синтезе алгоритмов коррекции и демпфирования высокоточных инерциальных навигационных систем актуальным является использование наиболее точных моделей погрешностей чувствительных элементов – гироскопов и акселерометров. В связи с этим, особенно для систем, построенных на поплавковых гироскопах, целесообразным является учет температурной зависимости ухода гироскопа, поскольку параметры гироскопов с жидкостным подвесом существенно зависят от изменения температуры. Следует отметить, что чувствительные элементы инерциальной навигационной системы (ИНС) установлены в едином гироскопическом приборе, поэтому применение модели ухода датчика, учитывающей изменение температуры, особенно востребовано при прогреве гироскопического прибора до рабочей температуры и во время калибровки.

В работе рассматривалась инерциальная навигационная система полуаналитического типа на поплавковых чувствительных элементах, установленных на стабилизированной платформе. Обработка информации в ИНС в режиме калибровки и в рабочем режиме производилась с использованием фильтра Калмана [1–3], на вход которого подавалась разность координат и скоростей, вырабатываемая инерциальной системой и внешним источником навигационной информации, например, спутниковой навигационной системой и относительным лагом.



Как известно, система термостабилизации поплавкового гироскопа осуществляется подогревом жидкости до температуры, несколько превышающей максимальную рабочую температуру окружающей среды [4]. Однако при варьировании температуры жидкости меняется и ее плотность. Вследствие этого можно наблюдать изменение плавучести поплавка, что и приводит к появлению дополнительного ухода гироскопа. Для компенсации такого ухода гироскопа необходимо по данным стендовых испытаний оценить зависимость ухода гироскопа от изменения температуры и составить соответствующую модель.

В настоящей работе для известной модели погрешности чувствительного элемента инерциальной системы полуаналитического типа рассмотрены особенности применения двух методов идентификации неизвестных параметров модели, и приведены результаты сравнительного моделирования методического примера.

**Методы идентификации параметров модели ухода гироскопа.** Уход гироскопа в рассматриваемой ИНС описывается в виде суммы двух составляющих: случайной константы  $\bar{\varepsilon}(t)$  и марковского процесса первого порядка  $\tilde{\varepsilon}(t)$ . Для учета температурной зависимости ранее было предложено расширить существующую модель случайного ухода следующим образом:

$$\dot{\tilde{\varepsilon}}(t) = -\alpha\tilde{\varepsilon}(t) + \beta T(t) + \sqrt{2\alpha\sigma_{\varepsilon}^2}\xi(t), \varepsilon(t) \in N\{0, \sigma_{\varepsilon}^2\}, \quad (1)$$

где  $\xi(t)$  – гауссовский белый шум единичной интенсивности, не коррелированный с  $\tilde{\varepsilon}(0)$ ;  $\tilde{\varepsilon}(0)$  – распределено по нормальному закону с дисперсией  $\sigma_{\varepsilon}^2$ ;  $\alpha = 1/\tau$ , где  $\tau$  – неизвестный интервал корреляции;  $\beta$  – неизвестный параметр модели;  $T(t)$  – известная температура внутри гироскопа.

Для идентификации неизвестных параметров модели ухода гироскопа существует ряд подходов. Метод, изложенный в [5], основанный на рекуррентном фильтре Калмана и гауссовской аппроксимации апостериорной плотности, довольно прост для реализации, но имеет достаточно большую относительную ошибку оценки неизвестных параметров. В связи с этим имеет смысл для предложенной модели ухода гироскопа, в которой неизвестны два параметра, рассмотреть идентификацию на основе алгоритмов нелинейной фильтрации [6]. В настоящей работе для проверки эффективности метод идентификации на основе алгоритмов нелинейной фильтрации был рассмотрен для случая только одного неизвестного коэффициента  $\alpha$ , температурный коэффициент  $\beta$  при этом предполагался известным.

Для проверки алгоритма было проведено математическое моделирование методического примера, в котором температура внутри гироскопического прибора полагалась постоянной. Результаты моделирования сведены в таблице. В этой же таблице для сравнения приведены результаты, ранее полученные [7] на основе обобщенного фильтра Калмана.

Таблица. Оценка параметра  $\alpha$

Метод идентификации	$\tau, \text{с}^{-1}$	Относительная погрешность, %
Алгоритм на основе обобщенного фильтра Калмана	1	7,51
	0,1	7,51
	0,001	7,51
Алгоритм в рамках байесовского подхода	1	0,39
	0,1	0,43
	0,001	0,14

При этом для оценки качества алгоритма предполагается использовать реализацию (1) с различными значениями  $\tau$ . Результаты идентификации неизвестного параметра  $\alpha$  приведены в таблице. Результаты сравнения двух алгоритмов показали, что алгоритм на

основе рекуррентного фильтра Калмана позволяет идентифицировать неизвестный параметр  $\alpha$  точнее, чем алгоритм на основе обобщенного фильтра Калмана приблизительно на 16%.

**Заключение.** Изложена задача идентификации параметров модели ухода поплавкового гироскопа. Результаты моделирования показали, что точность оценивания неизвестных параметров модели на основе нелинейной фильтрации существенно превышает точность оценивания с применением соотношений фильтра Калмана для линеаризованной модели измерений.

Перспективной задачей дальнейших исследований является обработка натуральных данных, полученных при испытаниях гироскопов.

### Литература

1. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. – Изд. 3-е, испр. и дополн. – СПб.: Электроприбор, 2017. – 509 с.
2. Емельянцева Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Под общ. ред. акад. В.Г. Пешехонова. – СПб.: Электроприбор, 2016. – 394 с.
3. Вайсгант И.Б., Литвиненко Ю.А. Погрешности выработки навигационных параметров платформенными инерциальными системами среднего класса точности в зависимости от широты места // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. – № 9. – С. 43–50.
4. Веселов В.А., Гробоной Р.Н., Ипатов О.С., Кузнецов В.Г., Медведев В.И. Гироскопические измерительные приборы и устройства: учебное пособие. – СПб.: Балт. гос. техн. Ун-т., 2003. – 122 с.
5. Тупышев В.А., Иванов Д.П. Особенности применения фильтров Калмановского типа при нелинейности в уравнениях динамики // XXXI конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. – 2018.
6. Моторин А.В. Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации // Навигация и управление. – 2018. – С. 151–153.
7. Иванов Д.П., Литвиненко Ю.А. Сравнение алгоритмов определения неизвестных параметров модели ухода гироскопа // Навигация и управление движением. – 2018. – С. 144–147.

**Титов Роман Умарович**

Год рождения: 1995

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р4230Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: roman100895@rambler.ru

**Моторин Андрей Владимирович**

Год рождения: 1989

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н.;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ст.н.с.

e-mail: motorin.a@mail.ru

**Степанов Олег Андреевич**

Год рождения: 1949

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
д.т.н., профессор;АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», начальник научно-  
образовательного центра

e-mail: ostepanov@eprib.ru

**УДК 629.05****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕПЯТСТВИЙ И ДАЛЬНОСТЕЙ ДО НИХ В АЛГОРИТМАХ  
ОДНОВРЕМЕННОЙ НАВИГАЦИИ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ****Титов Р.У.** (Университет ИТМО), **Моторин А.В.** (Университет ИТМО);

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

**Научный руководитель – д.т.н., профессор Степанов О.А.**

(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Приведено моделирование работы одного из методов предварительной обработки данных лазерного дальномера для решения задачи одновременной навигации и картографирования робота. Моделирование данных робота и окружающей обстановки проведено с использованием программного обеспечения Robot Operating System, сам алгоритм реализован в пакете MATLAB.

**Ключевые слова:** одновременная навигация и картографирование, лазерный дальномер, навигация роботов.

**Введение.** Задачу одновременной локализации и построения карты можно определить, как задачу оценки координат объектов окружающего пространства, образующих карту, и, в то же время определение положения объекта-наблюдателя относительно них. Для решения этой задачи, как правило, используются измерения дальностей от подвижного объекта-наблюдателя до объектов карты. Традиционно решение совместной задачи навигации и картографирования (Simultaneous localization and mapping, SLAM) востребовано при навигации автономных роботов в условиях закрытых помещений, когда сигналы спутниковых систем недоступны. Несмотря на разнообразие существующих методов SLAM практически во всех можно выделить две подзадачи: задачу предварительной обработки данных измерителя (называемую в западной литературе front-end) и задачу комплексной

обработки полученных данных (называемую также back-end) [1–5]. Первая задача (front-end) заключается, как правило, в выделении особых точек карты по данным измерителя. Далее измерения преобразуются к дальностям и направлениям на эти особые точки, представляющие собой, в сущности, точечные ориентиры.

В настоящей работе рассматривался один из методов предварительной обработки данных лазерного дальномера [6], позволяющий получить требуемые для решения задачи одновременной навигации и картографирования робота дальности и направления на точечные ориентиры, и приведено моделирование его работы.

**Решение задачи выделения и слежения за особыми точками карты с использованием лазерного дальномера.** Моделирование данных робота и окружающей обстановки проведено с использованием программного обеспечения (ПО) Robot Operating System (ROS) [7] и среды Gazebo. В результате был смоделирован робот «Turtlebot», и с использованием функций «Gmapping» и визуализации «Rviz» получены модельные данные лазерного сканера и построена карта местности (рисунок, а).

Смоделированные таким образом данные, включающие расстояния до каждого препятствия в некотором круговом секторе, обладают большой степенью достоверности, например, такими недостатками реальных измерений дальномера, как случайные пропуски измерений дальности. В работе реализован алгоритм, определяющий число ориентиров, дистанцию и направление на них по этим данным (рисунок, б). Определение количества ориентиров осуществляется за счет кластеризации измерений путем определения количества пропусков в измерениях дальностей, получавшихся в тех случаях, когда дальность до объекта больше максимальной дальности измерений дальномера (рисунок, б).

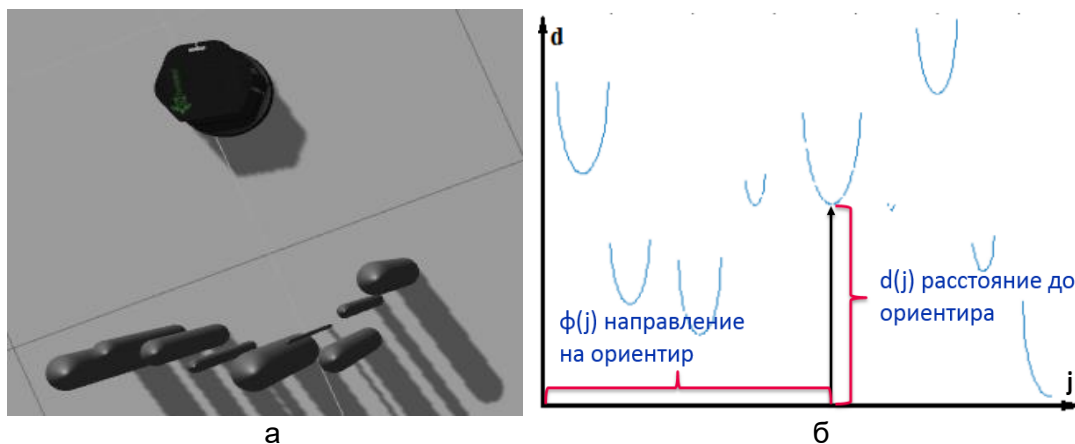


Рисунок. Визуализация работы симулятора «Gazebo» (а); отображение полученных данных в MATLAB,  $d$  – дальности,  $\phi$  – соответствующие им направления измерений (б)

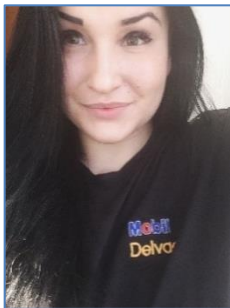
Учитывались возможные однократные или двукратные пропуски измерений дальномера. Далее для каждого кластера определялось минимальное расстояние и соответствующее ему направление, и решалась задача ассоциации ориентиров двух последовательных измерений «кадрах» лазерного дальномера. Она основана на том, что для всех наблюдаемых ориентиров постепенно создается база данных, содержащая их координаты, характеристики точности определения этих координат и количество их наблюдений. Для каждого ориентира, полученного с нового «кадра» лазерного дальномера, рассчитывается дистанция до известных ориентиров из базы, и ориентиры с минимальной дистанцией объединяются в пары. Далее рассчитанная дистанция сравнивается с неким эмпирическим порогом. В случае если дистанция больше порога, то в базу добавляется новый ориентир, и количество его наблюдений становится равным единице. В противном случае ориентир приписывается уже известному, количество его наблюдений увеличивается. После нескольких наблюдений заданного ориентира он записывается как надежный, а

данные о его предполагаемых координатах, дальности и направления до него, используются для уточнения расположения как его самого, так и других ориентиров и координат объекта.

**Заключение.** Проведено моделирование работы одного из методов предварительной обработки данных лазерного дальномера для решения задачи одновременной навигации и картографирования робота с использованием ПО ROS и MATLAB. Алгоритм заключается в определении числа ориентиров, дистанции и направления на них. При решении такой задачи учитывались возможные пропуски измерений, а также необходимость дальнейшей ассоциации полученных измерений.

### Литература

1. Dissanayake G., Newman P., Clark S., Durrant-Whyte H.F., Csorba M. A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 2001. – V. 17. – № 3. – P. 229–241.
2. Durrant-Whyte H.F. and Bailey T. Simultaneous localisation and mapping (SLAM): Part I // *IEEE Robot. Autom. Mag.* – 2006. – V. 13. – № 2. – P. 99–110.
3. Bailey T. and Durrant-Whyte H.F. Simultaneous localisation and mapping (SLAM): Part II // *Robot. Auton. Syst.* – 2006. – V. 13. – № 3. – P. 108–117.
4. Dissanayake G., Huang S., Wang Z., and Ranasinghe R. A review of recent developments in simultaneous localization and mapping // *Proc. Int. Conf. Ind. Inform. Syst.* – 2011. – P. 477–482.
5. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J.J. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2016. – V. 32. – № 6. – P. 1309–1332.
6. Лазерный сканер HOKUYO URG-04LX-UG01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robotgeeks.ru/collection/parts/product/hokuyo-urg-04lx-ug01>, своб.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://robocraft.ru/blog/robosoft/721.html>, своб.



**Торопова Марина Андреевна**

Год рождения: 1997

Университет ИТМО, факультет системы управления и робототехники, студент группы № R41302

Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением и навигация

e-mail: toropova\_m@list.ru



**Агаева Александра Алиевна**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет системы управления и робототехники, студент группы № R41302

Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением и навигация

e-mail: alx.agaeva@mail.ru



**Моторин Андрей Владимирович**

Год рождения: 1989

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники, к.т.н.;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ст.н.с.

e-mail: motorin.a@mail.ru

УДК 550.831.016

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ  
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ**

**Торопова М.А.** (Университет ИТМО), **Агаева А.А.** (Университет ИТМО)

**Научный руководитель – к.т.н., ст.н.с. Моторин А.В.**

(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00627).

Рассмотрена задача определения аномалии силы тяжести с борта подвижного судна. Целью работы являлось исследование точности оценивания аномалии силы тяжести в зависимости от скорости движения, параметров волнения, а также параметров измеряемого поля аномалии. Приведены результаты точности оценивания аномалии в режимах фильтрации и сглаживания в зависимости от перечисленных факторов, полученные при моделировании решения задачи.

**Ключевые слова:** аномалия силы тяжести, фильтрация, сглаживание, гравиметрия.

**Введение.** Аномалия силы тяжести (АСТ) является разностью между наблюдаемой силой тяжести и ее теоретическим (нормальным) значением, определяемым выбранной моделью Земли. Определение АСТ и составление соответствующих карт имеет важное теоретическое и прикладное значение, в частности для задач региональной геологии, геодезии и навигации по геофизическим полям. Получение карт АСТ может осуществляться различными способами, однако наиболее широкое распространение получили морская гравиметрия и авиагравиметрия [1]. В настоящей работе рассматривалась задача морской

гравиметрии, при которой измерение ускорения силы тяжести производится относительными гравиметрами, установленными на надводных судах [2, 3].

Гравиметр, установленный на движущемся судне, измеряет кажущееся вертикальное ускорение, включающее как АСТ, так и вертикальные ускорения носителя. С целью выделения АСТ на фоне вредных вертикальных ускорений судна применяются различные алгоритмы фильтрации и сглаживания. Широко применяются так называемые частотные методы фильтрации и сглаживания [2, 3]. Наряду с этим получают применение и оптимальные калмановские алгоритмы обработки [4]. Однако точность последних в значительной степени зависит от адекватного выбора моделей полезного сигнала и погрешностей измерений, а также параметров этих моделей [5]. Для решения задачи оценивания АСТ в калмановской постановке, что в практике морской съемки осуществляется без привлечения внешних измерителей, необходимо ввести две модели: модель аномалии и модель волнения. Параметрами этих моделей являются, в частности, скорость движения носителя, частота и нерегулярность волнения, изменчивость поля АСТ в районе съемки [6]. Исследованию потенциальной точности решения задачи оценивания АСТ в режимах фильтрации и сглаживания в зависимости от этих фактов и посвящена настоящая работа.

**Результаты моделирования решения задачи.** Оценка точности решения осуществлялась с использованием моделирования с помощью программы [7].

В качестве модели поля АСТ использовалась модель Джордана, приведенная к виду пространства состояний. Параметрами такой модели являлись скорость движения носителя и среднеквадратическое отклонение (СКО) изменчивости поля АСТ. Результаты оценки точности решения задач фильтрации и сглаживания АСТ в зависимости от этих параметров представлены на рис. 1. Видно, что режим сглаживания дает существенное (до 5 раз) увеличение точности оценивания АСТ практически при всех условиях съемки. Моделирование показало также ожидаемое снижение точности оценивания при увеличении скорости и изменчивости поля АСТ.

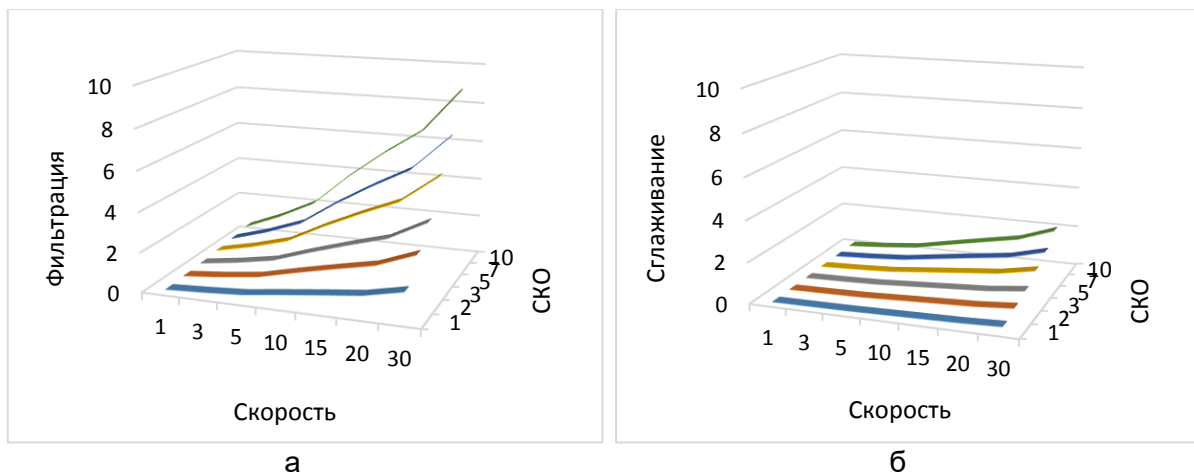


Рис. 1. Установившиеся значения СКО погрешности оценивания АСТ в режиме фильтрации в зависимости от скорости движения носителя (на графике обозначена как «Скорость») и СКО изменчивости аномалии (на графике обозначена как «СКО») (а); аналогичные значения СКО погрешности оценивания АСТ для режима сглаживания (б)

Для описания модели качки был взят узкополосный марковский процесс второго порядка, параметрами которого являлись преобладающая частота и нерегулярность. Результаты исследования зависимости точности оценивания АСТ от значений этих параметров представлены на рис. 2. Выявлено, что в отличие от предыдущего случая, параметры волнения незначительно влияют на характеристики точности съемки.

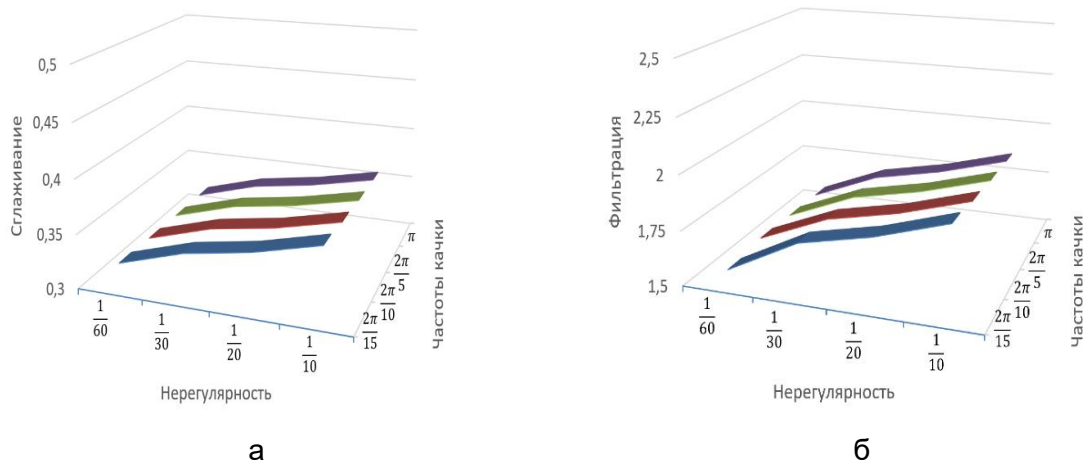


Рис. 2. Установившиеся значения СКО погрешности оценивания АСТ в режиме фильтрации в зависимости от частоты и нерегулярности качки (а); аналогичные значения СКО погрешности оценивания АСТ для режима фильтрации (б)

**Заключение.** В работе проведено исследование точности оценивания АСТ в режимах фильтрации и сглаживания. По результатам моделирования установлено, что с увеличением скорости и изменчивости АСТ точность оценивания ожидаемо снижается, однако частотные параметры вертикальных ускорений носителя несущественно влияют на точность. Показано также, что режим сглаживания дает существенное (до 5 раз) увеличение точности оценивания АСТ практически при любых условиях.

### Литература

1. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, тех. ред. Степанов О.А. – СПб.: Электроприбор, 2017. – 390 с.
2. Bolotin Y.V., Yurist S.S. Suboptimal smoothing filter for the marine gravimeter GT-2M // Gyroscopy and navigation. – 2011. – V. 2. – № 3. – P. 152–155.
3. Краснов А.А., Соколов А.В. Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2009. – № 20. – С. 353–357.
4. Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С. Результаты эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 1(84). – С. 98–104.
5. Stepanov O.A., Koshaev D.A. Analysis of Filtering and Smoothing Techniques as Applied to Aerogravimetry // Gyroscopy and Navigation. – 2010. – № 1. – P. 19–25.
6. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. – Изд. 3-е, исправл. и дополн. – СПб.: Электроприбор, 2017. – 509 с.
7. Степанов О.А., Кошаев Д.А. Универсальные Matlab-программы анализа потенциальной точности и чувствительности алгоритмов линейной нестационарной фильтрации // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 2. – С. 81–93.



**Хассо Мария Александровна**

Год рождения: 1985

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № 41301;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движения  
и навигация

e-mail: makhasso@gmail.ru

**Евстифеев Михаил Илларионович**

Год рождения: 1954

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
д.т.н., доцент;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», начальник отдела

e-mail: office@elprib.ru

УДК 531.383

**АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЯ УГЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ  
ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА С ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИМИ ГИРОСКОПАМИ****Хассо М.А., Евстифеев М.И.**

(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

**Научный руководитель – д.т.н., доцент Евстифеев М.И.**

(Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

Рассмотрен принцип работы измерителя угловых деформаций подвижного объекта с отечественными волоконно-оптическими гироскопами. Разработана конструкция прибора и проведен анализ вибростойкости при действии внешних ускорений. Предложена методика расчета угловых отклонений, и показано, что конструкция удовлетворяет предъявленным требованиям.

**Ключевые слова:** волоконно-оптические гироскопы, отечественные производители, измеритель, угловые деформации.

**Введение.** В условиях эксплуатации протяженный подвижный объект, такой как корабль или большой самолет, претерпевает значительные деформации вследствие разнообразных причин, среди которых можно назвать следующие:

- усталостное напряжение материала подвижного объекта;
- тепловые деформации в условиях эксплуатации;
- упругие колебания при внешних возмущениях движения;
- изменение внутренней нагрузки [1].

Управление движением подвижного объекта осуществляется, как правило, с использованием центральной системы гиросtabilизации (СГС), расположенной вблизи центра масс объекта. Для учета динамических деформаций корпуса объекта в различных точках корабля или самолета, удаленных от центра масс, необходим измеритель угловых деформаций (ИД), размещаемый на периферии корпуса. Измерения, производимые ИД, чрезвычайно важны для функционирования различных систем, например, таких как корабельный артиллерийский комплекс [2, 3]. Для измерения углов ориентации в динамике требуется достаточно высокая точность определения этих углов с использованием интегрирования сигналов датчиков угловых скоростей, в качестве которых могут быть использованы волоконно-оптические гироскопы (ВОГ).

ИД должен функционировать в режиме реального времени, что подразумевает обработку информации от чувствительных элементов и устройств (ВОГ, акселерометры, СГС) и транслирование информации для потребителей. Работа в реальном времени подразумевает гарантированное время реакции на события, для которых оно является критическим фактором при всех возможных сценариях работы.

Принцип работы ИД состоит в следующем. С использованием СГС, установленной в центре качания подвижного объекта, определяются параметры ориентации –  $\Theta_{СГС}$  (угол килевой качки или тангажа),  $\Psi_{СГС}$  (угол рыскания или курса),  $\Phi_{СГС}$  (угол бортовой качки или крена). Аналогичные измерения производят с использованием ИД, получая значения  $\Theta_{ИД}$ ,  $\Psi_{ИД}$ ,  $\Phi_{ИД}$ . Угловые деформации подвижного объекта в точке установки ИД определяются как разности

$$\Delta\Theta = \Theta_{СГС} - \Theta_{ИД}; \Delta\Psi = \Psi_{СГС} - \Psi_{ИД}; \Delta\Phi = \Phi_{СГС} - \Phi_{ИД}.$$

Задача определения параметров ориентации в заданной точке переходит в задачу измерения угловых деформаций [4].

Прибор ИД построен по принципу бесплатформенных систем и включает триаду точных акселерометров, микропроцессорный блок цифрового вычислителя, триаду датчиков угловых скоростей (ВОГ с замкнутым контуром обратной связи). Волоконно-оптические датчики обладают следующими важными преимуществами – отсутствие подвижных частей, высокая чувствительность к угловой скорости, малое время готовности, широкий динамический диапазон измеряемых угловых скоростей.

Лидирующие позиции на рынке ВОГ занимают такие зарубежные компании, такие как: Northrop Grumman; Honeywell (США); IXblue (Франция). Отечественными производителями ВОГ являются компании: ООО НПК «Оптолинк»; «Пермская НППК»; АО «НИИ ПМ» (филиал ЦЭНКИ); ЗАО «Физоптика»; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Для измерителя угловых деформаций выбран ВОГ (рис. 1) разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» класса точности 0,01 град/ч с диаметром катушки чувствительного элемента 150 мм [5].



Рис. 1. Внешний вид опытного образца ВОГ (без наружного магнитного экрана)

Основные характеристики выбранного ВОГ следующие:

- диапазон измерений угловой скорости  $\pm 400$  град/с;
- случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала  $\leq 0,01(1s)$  град/ч;
- длина волоконного контура 2000 м;
- габаритные размеры  $\varnothing 150 \times 45$  мм.

Использование выбранных ВОГ позволяет достичь точности динамических измерений угловых деформаций подвижного объекта на уровне 5 угл. мин.

Разработанная с участием автора конструкция прибора ИД выполнена в брызгозащищенном исполнении, имеет цилиндрическую форму и состоит из двух блоков, разделенных перегородкой (рис. 2). Такая конфигурация позволяет отделить блок чувствительных элементов, состоящий из триады акселерометров и триады ВОГ, от блока цифрового вычислителя и системы электропитания. Это обеспечивает уменьшение влияния тепловыделения энергонасыщенного объема вычислителя от объема блока чувствительных элементов, для которого влияние тепловых воздействий очень существенно.

Следует отметить, что используемая модель ВОГ имеет цифровой выходной сигнал, что не требует наличия аналого-цифрового преобразователя в составе цифрового вычислителя.

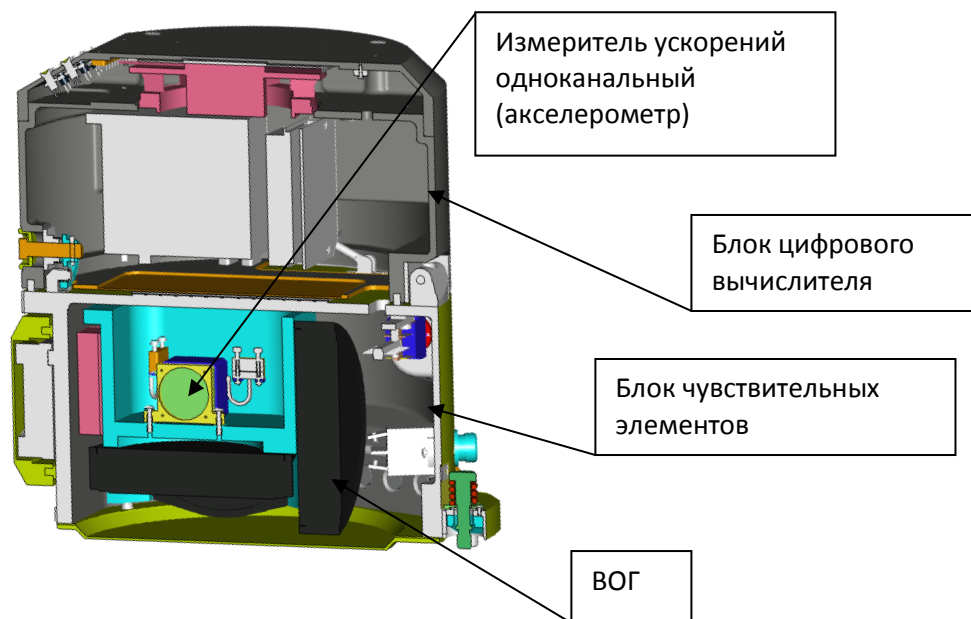


Рис. 2. Конструкция измерителя угловых деформаций

Триада акселерометров и триада ВОГ установлена на кронштейне, таким образом, чтобы обеспечить стабильность и вибростойкость прибора в процессе эксплуатации.

**Анализ конструкции.** Для анализа конструкции в части удовлетворения требований по стойкости была построена компьютерная физико-механическая модель на основе трехмерной (3D) модели, использованной при проектировании.

В качестве расчетного модуля использован модуль конечно-элементного анализа Pro/Mechanica, входящий в состав программы Pro/Engineer Creo. Конечно-элементная модель, обеспечивающая разбиение модели с помощью конечных элементов получена в автоматическом режиме стандартными средствами Pro/Mechanica. Расчетная модель была упрощена и исключены элементы конструкции, не влияющие на точность результатов расчета (мелкие отверстия, скругления и фаски).

Анализ конструкции проводился в следующей последовательности:

- задание свойств материалов для деталей и узлов конструкции;
- определение граничных условий и поверхностей крепления;
- расчет собственных частот и выявление резонансных мод колебаний;
- задание широкополосного вибрационного воздействия амплитудой  $2\text{ g}$  ( $19,8\text{ м/с}^2$ ) в полосе частот от 1 до 60 Гц;
- расчет угловых отклонений кронштейна с чувствительными элементами при воздействии поступательной вибрации.

В качестве основного механизма рассеяния энергии при расчете принят механизм демпфирования. Вследствие большого количества переходных деталей и, соответственно,

большого количества стыков, наибольший вклад в коэффициент демпфирования вносит конструкционное демпфирование, связанное с потерей энергии при взаимном проскальзывании стыков установочных поверхностей деталей и узлов.

На рис. 3 показаны результаты расчета частот собственных колебаний платформы с ВОГ и акселерометрами. Определено, что первая мода колебаний имеет частоту 65 Гц, вторая мода колебаний происходит на частоте 132 Гц.

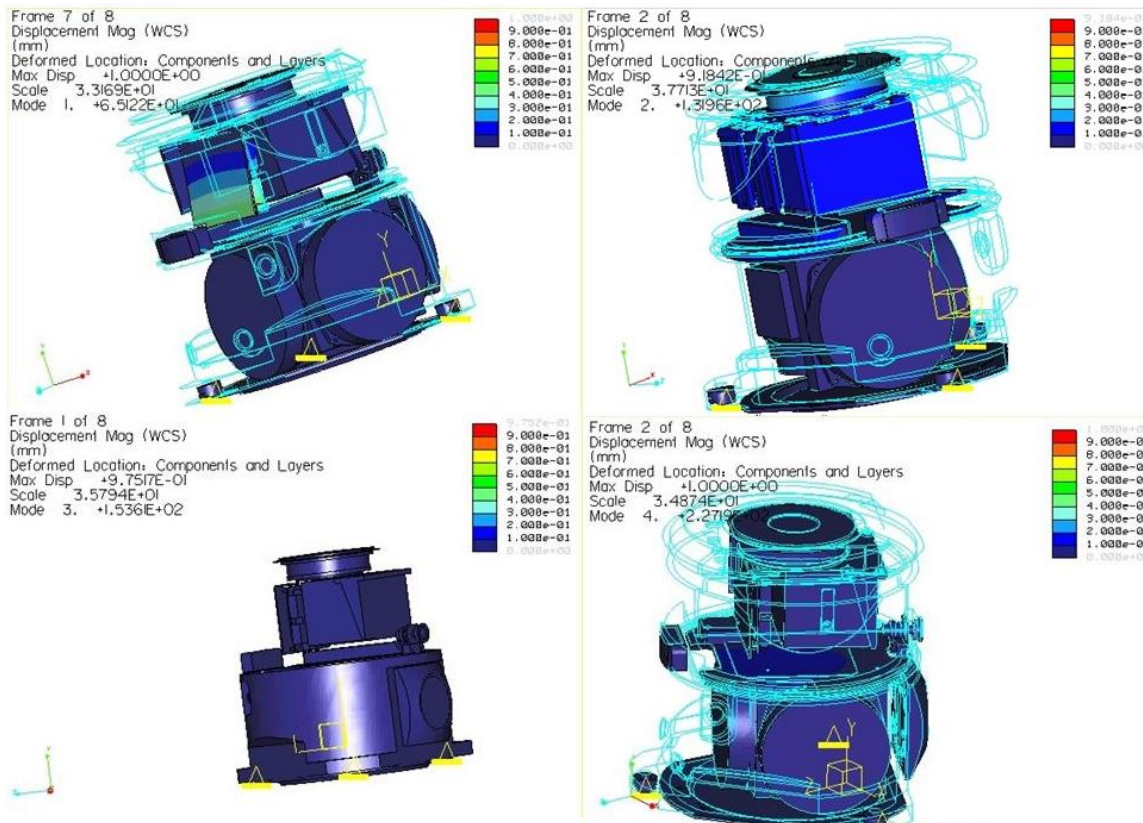


Рис. 3. Расчет собственных частот ИД

В результате конечно-элементного анализа рассчитано, что максимальные линейные перемещения элементов на платформе не превосходят 0,15 мм. Это хорошо согласуется с аналитическими оценками возникающих деформаций.

Действительно, максимальная амплитуда отклонений под действием ускорения определяется выражением

$$x = \frac{W}{\omega_1^2} Q, \quad (1)$$

где  $x$  – амплитуда отклонений;  $W$  – амплитуда ускорения;  $\omega_1$  – первая собственная частота;  $Q$  – добротность колебательного контура.

При  $W=19,8$  м/с<sup>2</sup>;  $\omega_1=(2\pi 65)$  1/с;  $Q=1,5$  имеем из (1)  $x=0,178$  мм, что близко к величине, полученной из численного расчета.

Угловое отклонение кронштейна с ВОГ относительно номинального положения под действием инерционного ускорения (вибрации) определялось из выражения

$$\alpha = x/L, \quad (2)$$

где  $L$  – длина базовой поверхности установки ВОГ.

При  $L=200$  мм имеем из выражения (2) значение  $\alpha=3$  угл. мин, что не превосходит достижимой точности динамических измерений угловых деформаций подвижного объекта на уровне 5 угл. мин.

**Выводы.** Рассмотрен принцип работы измерителя угловых деформаций подвижного объекта с отечественными волоконно-оптическими гироскопами. Разработана конструкция прибора и проведен анализ вибростойкости при действии внешних ускорений. Предложена методика расчета угловых отклонений, и показано, что конструкция удовлетворяет предъявленным требованиям.

### Литература

1. Ермолов А.Ю., Маринченко А.Н., Пчелин В.В., Францев С.Л. Измеритель статической деформации корпуса корабля на основе бесплатформенного гироскопа // Материалы VI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2004. – С. 47–51.
2. Патент RU 2261417 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 C 21/18. Способ определения деформаций и углов ориентации корабля с учетом деформаций / Адамов И.И.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2004117042/28; заявл. 28.05.2004; опубл. 27.09.2005, Бюл. № 27(Пч.). – 13с.: ил.
3. Патент RU 2542821 Российская Федерация, МПК F 41 G 5/20. Корабельный артиллерийский комплекс с режимом компенсации влияния деформаций корпуса корабля / Эстрин А.Б., Чистов В.Д., Мещеряков А.М., Иванов В.В., Марченко Б.В., Попов Д.М.; заявитель и патентообладатель ОАО «Конструкторское бюро «Аметист». – № 2013138631/11; заявл. 21.08.2013; опубл. 27.02.2015, Бюл. № 6(Пч.). – 11с.: ил.
4. Торопов А.Б., Тупысев В.А. Определение деформации корпуса корабля с использованием информации от инерциальной навигационной системы и датчиков угловых скоростей // Материалы VII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2005. – С. 25–32.
5. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 78–85.



**Чалков Виктор Викторович**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № R41302;

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

Направление подготовки: 24.04.02 – Системы управления движением  
и навигация

e-mail: rozertreit@gmail.com



**Шевченко Александр Николаевич**

Год рождения: 1982

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

e-mail: standw.shev@gmail.com



**Безмен Глеб Владимирович**

Год рождения: 1976

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», к.т.н.

e-mail: gbezmen@elprib.ru

**УДК 537.624.8**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ЭКРАНА КВАНТОВОГО ДАТЧИКА  
ВРАЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФОРМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА  
ЦЕЗИЯ**

**Чалков В.В.** (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»),

**Шевченко А.Н.** (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

**Научный руководитель – к.т.н. Безмен Г.В.**

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

В работе приведен алгоритм измерения остаточного магнитного поля по сигналам параметрического резонанса цезия, который подтверждается полученными данными и обосновывает возможность измерения остаточного магнитного поля в магнитном экране квантового датчика вращения, проводя анализ формы параметрического резонанса цезия.

**Ключевые слова:** квантовый датчик вращения, магнитометр, магнитное поле, магнитный экран, резонанс цезия.

**Введение.** В настоящее время стало известно, что для эффективной работы квантового датчика вращения (КДВ) необходимо, чтобы внешнее магнитное поле не влияло на значение индукции магнитного поля внутри чувствительного элемента (ЧЭ) [1]. Для обеспечения требуемых условий используются: система пассивного экранирования, и активная система компенсации магнитных полей, построенная на основе магнитных катушек, создающих компенсирующее магнитное поле. Одной из важных проблем при создании эффективного экранирования является наличие остаточной намагниченности магнитного экрана, приводящей к появлению неоднородного магнитного поля внутри ЧЭ. Подобная неоднородность снижает степень поляризации рабочего вещества, что может приводить к неработоспособности КДВ.

В процессе сборки прибора имеется возможность вызвать его намагничивание, то в этой связи появляется необходимость измерения остаточной намагниченности магнитного экрана КДВ. Для измерения остаточной намагниченности экранов КДВ, необходима точность измерений на уровне единиц нанотесла и возможность проводить измерение намагниченности как отдельных элементов КДВ, так и в собранной конструкции. Поскольку перечисленные факторы не позволяют применить имеющиеся на сегодняшний день магнитометры, то возникает задача разработки косвенного метода измерения остаточной намагниченности экрана по сигналам, вырабатываемым КДВ, в частности, по форме сигнала параметрического резонанса цезия, входящего в состав газовой смеси ЧЭ.

**Измерение остаточной намагниченности магнитного экрана.** В работе рассматривался КДВ [2], используемый для решения задач навигации, принцип действия которого заключался в определении скорости вращения основания, по данным о значениях гиромагнитного отношения, значении индукции магнитного поля и наблюдаемой ларморовской частоты прецессии используемого вещества:

$$\Omega = B\gamma - \omega, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – скорость вращения основания;  $B$  – значение индукции магнитного поля;  $\gamma$  – гиромагнитное отношение;  $\omega$  – наблюдаемая частота ларморовской прецессии.

Для исследования остаточной намагниченности магнитного экрана датчик использовался в режиме цезиевого магнитометра [3–6], но в предлагаемом методе расстройка производилась путем изменения значения индукции постоянного магнитного поля. В результате воздействия на цезий суммарного значения магнитного поля катушки, магнитного экрана и изменения направления постоянного магнитного поля, создаваемого катушкой, путем подачи на нее токов разного направления, появляется возможность определения остаточного магнитного поля в экране на основе следующего выражения:

$$\begin{cases} B_0 = K_{\text{катушки}} I_{+z} + B_{\text{ост.}} \\ B_0 = K_{\text{катушки}} I_{-z} - B_{\text{ост.}} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $B_0$  – рассчитанное значение постоянного магнитного поля резонанса;  $B_{\text{ост.}}$  – остаточное магнитное поле экрана;  $K_{\text{катушки}}$  – коэффициент катушки;  $I_z$  – ток, подаваемый на катушку.

Определить неизвестное значение коэффициента  $K_{\text{катушки}}$  можно путем аппроксимации сигнала резонанса цезия, поступающего с измерительного канала фотоприемника КДВ (рисунок), уравнением дисперсной кривой (3), параметры которой были выбраны таким образом, чтобы обеспечивать соответствие значений амплитуды и отстройки экспериментальных данных и сигналов модели:

$$y = \frac{a(I_z - I_{\pm z}) + b}{(I_z - I_{\pm z})^2 + \lambda^2} + y_0, \quad (3)$$

где  $y$  – аппроксимация резонансного сигнала цезия;  $a$  – амплитуда резонансного сигнала цезия;  $I_{\pm z}$  – величина тока, соответствующая центру резонансной линии цезия;  $\lambda$  – полуширина резонансного сигнала цезия;  $b$  – составляющая, учитывающая изменение формы разносной линии цезия, вызванное остаточным магнитным полем;  $y_0$  – постоянная составляющая резонансного сигнала цезия.

Выполненная аппроксимация с учетом выражения (2) позволила определить центры резонансов цезия, с использованием которых были рассчитаны значения  $K_{\text{катушки}}$  и напряженность остаточного магнитного поля экрана (4)–(5) (рисунок).

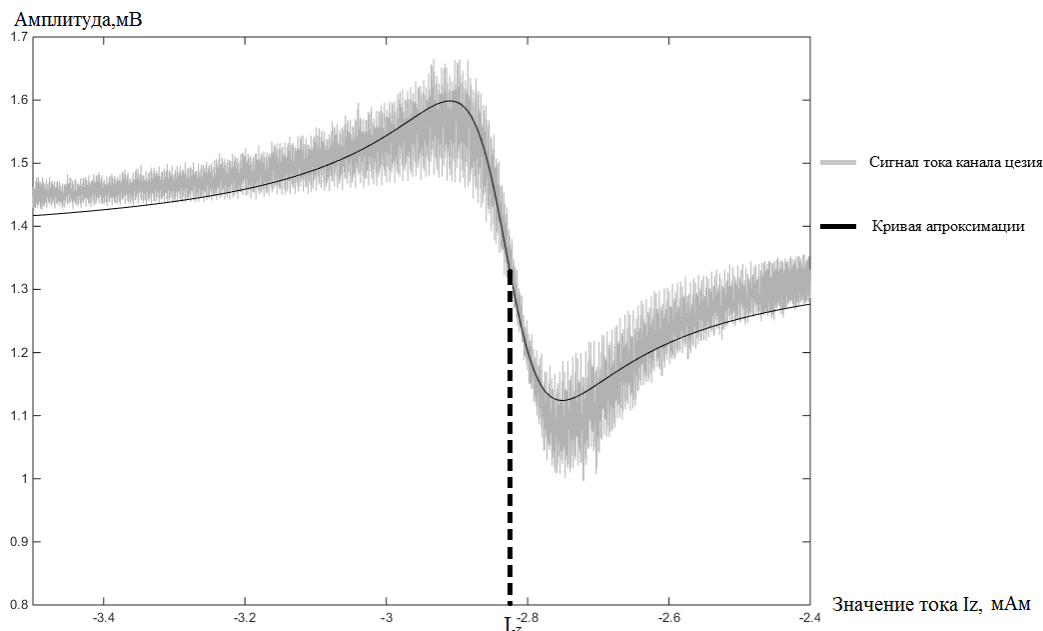


Рисунок. График сигнала тока фотоприемника и аппроксимации

Полученные данные сведены в таблицу.

$$K_{\text{кагушки}} = \frac{2B_0}{I_{+z} + I_{-z}}, \quad (4)$$

$$B_{\text{ост.}} = \frac{1}{2} \left( \frac{2B_0}{I_{+z} + I_{-z}} I_{-z} - \frac{2B_0}{I_{+z} + I_{-z}} I_{+z} \right). \quad (5)$$

Таблица. Данные по размагничиванию магнитного экрана КДВ

№	$I_{+z}$ , мА	$\lambda$ при $I_{+z}$ , мА	$I_{-z}$ , мА	$\lambda$ при $I_{-z}$ , мА	$K_{\text{кагушки}}$ , нТл/мА	$B_{\text{ост.}}$ , нТл
1	2,783	0,110	-2,794	0,105	3,587	-19,479
2	2,806	0,102	-2,789	0,103	3,576	29,917
3	2,769	0,099	-2,846	0,107	3,563	-136,451
4	2,800	0,109	-2,795	0,092	3,577	8,768

Анализируя таблицу, можно сделать вывод о том, что в ходе серии экспериментов было получено значение остаточного магнитного поля равное 8,8 нТл, которое является допустимым значением для магнитного экрана.

**Заключение.** Таким образом, изложенный алгоритм измерения остаточного магнитного поля по сигналам параметрического резонанса цезия, подтверждается полученными данными и обосновывает возможность измерения остаточного магнитного поля в магнитном экране квантового датчика вращения, анализируя форму сигнала параметрического резонанса цезия.

### Литература

1. Кислицина Е.А., Шевченко А.Н. Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2018. – Т. 1. – С. 176–179.
2. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. – 2018. – № 1(100). – С. 55–80.



3. Александров Е.Б., Вершовский А.К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – №6. – С. 605–637.
4. Ding M. Development and Prospect of Quantum Sensing Technology // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. – СПб.: Электроприбор, 2018. – 443 с.
5. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. – Физматлит, 2009. – 512 с.
6. Лёше А. Ядерная индукция. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 683 с.



**Чукичев Артемий Валерьевич**

Год рождения: 1996

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
студент группы № Р4177

Направление подготовки: 12.04.01 – Технологическая подготовка  
производства приборов и систем

e-mail: chukichevartemiy@gmail.com



**Андреев Юрий Сергеевич**

Год рождения: 1984

Университет ИТМО, факультет систем управления и роботехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: ysandreev@corp.ifmo.ru

УДК 658.562

**ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ  
В УСЛОВИЯХ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Чукичев А.В., Андреев Ю.С.**

**Научный руководитель – к.т.н., доцент Андреев Ю.С.**

В работе представлены результаты анализа состояния приборостроительного предприятия и выявления проблем, связанных с внедрением автоматизированных средств геометрического контроля.

**Ключевые слова:** автоматизация, средства измерения, геометрический контроль.

Важнейшим аспектом приборостроительного производства является контроль геометрии изготавливаемых деталей. Реализация всего комплекса контрольных операций с требуемой производительностью, задаваемой ритмом производства, и с достаточной надежностью, обеспечивающей правильную оценку качества продукции, возможно лишь при соответствующем оснащении служб технического контроля необходимыми и современными средствами измерения.

Цель данной работы – выявление проблем и сдерживающих факторов при внедрении автоматизированных средств геометрического контроля, в частности координатно-измерительной машины (КИМ).

Основные измерительные инструменты, используемые отделом технического контроля на многих приборостроительных предприятиях для проверки соответствия геометрических параметров изделий конструкторско-технологической документации, приведены в таблице.

Таблица. Измерительные инструменты

Наименование	Точность измерения
Штангенинструменты	0,01–0,05 мм
Микрометры	0,002–0,01 мм
Калибры	0,01–0,1 мм
Концевые меры длины	0,01–0,1 мм
Индикаторы часового типа	0,005–0,01 мм

Недостатками универсальных и специальных средств измерения (СИ) можно считать значительные временные затраты на контроль ограниченного количества параметров,

необходимость использования целого набора различных СИ, поскольку большинство из них имеют узкую область применения, а также негативное влияние человеческого фактора на результат измерения. Изготовление специальных СИ требует больших материальных и финансовых затрат и высокоточного оборудования, что может сильно влиять на сроки подготовки производства [1].

Порой, даже хорошо оснащенная измерительная лаборатория не в состоянии проконтролировать некоторые параметры изделия. Примером может послужить изделие «Корпус», представленное на рисунке, для которого нужно проверить межосевые расстояния рядов отверстий. В таких случаях невозможно обойтись без применения средств автоматизированного контроля с использованием программы измерения.

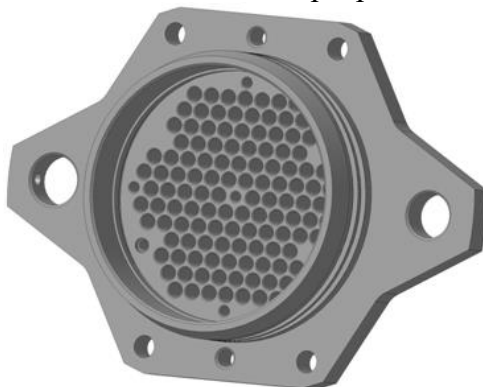


Рисунок. Трехмерная модель изделия «Корпус»

Для повышения производительности, снижения сроков технологической подготовки производства на предприятии необходимо внедрять автоматизированное оборудование. Внедрение такого оборудования позволит снизить количество ручного труда на ответственных операциях. В долгосрочной перспективе необходимо автоматизировать все контрольные операции, которые играют немаловажную роль в технологическом процессе изготовления изделия. Однако при внедрении любого нового автоматизированного оборудования могут возникнуть сложности:

1. сопротивление сотрудников предприятия – конечных пользователей оборудования, которое вызвано страхом перед нововведениями, опасением потерять работу или утратить свою незаменимость, боязнью перед существенно увеличивающейся ответственностью за свои действия;
2. увеличение нагрузки на сотрудников во время внедрения автоматизированных систем. Это связано с освоением новых знаний и технологий во время проведения опытной эксплуатации и при переходе к промышленному применению [2].

Каждое предприятие имеет свои особенности и уникальную организационную специфику. Поэтому при внедрении нового оборудования могут возникать особые нюансы, которые требуют рассмотрения и поиска методов решения.

На большинстве приборостроительных предприятий можно выделить следующие основные проблемы существующей системы контроля изделий:

- недостаточная оснащенность современными средствами измерений. Данная проблема связана с высокой стоимостью современного оборудования, вследствие чего возникает сложность выбора средств измерения для большой номенклатуры изделий данного предприятия. Анализ номенклатуры изделий предоставит возможность решить вопрос об использовании того или иного средства измерения;
- высокая длительность подготовки к контролю изделия. Для проведения геометрического контроля изделия на автоматизированном оборудовании, в том числе на КИМ, в автоматическом режиме обязательным условием является наличие трехмерной модели для разработки программы измерения. На многих предприятиях изделия зачастую либо не имеют 3D-моделей, либо модели содержат ошибки. В таких случаях оператору КИМ

приходится строить их самостоятельно или устранять ошибки, что значительно усложняет процесс измерения и увеличивает его длительность;

- недостаточная систематизация статистических данных о браке. Существующая система контроля брака представлена в виде бумажного носителя, в который вносится информация о бракованных изделиях в рамках одной партии;
- недостаточная квалификация сотрудников. Многие сотрудники отдела технического контроля не обладают необходимыми знаниями в области новых методов контроля, а также основных принципов измерения на КИМ. В связи с этим появляется проблема недоверия сотрудников к результатам измерения на измерительной машине.

Помимо проблем, описанных выше, для автоматизации процессов геометрического контроля в производстве необходимо решить следующий ряд задач:

- выбор автоматизированных средств измерения. Для этого необходимо провести анализ номенклатуры изделий с использованием конструкторской документации на изделия;
- выбор и закупка необходимой оснастки должна осуществляться в зависимости от габаритов и других конструктивных особенностей изделий, для которых будет использоваться средство измерения; могут требоваться различные виды оснастки – тиски, разжимные/зажимные оправки, призмы, прижимные элементы и т.п.;
- выбор и закупка программного обеспечения. Программное обеспечение измерительных систем зачастую является модульным. К примеру, для КИМ специальные модули измерения зубчатых колес, крыльчаток, резьб поставляются отдельно;
- внедрение средства измерения в технологические процессы. Необходимо разработать алгоритм выбора средства измерения, которому технолог будет следовать при составлении операционной карты контроля. Очевидно, что в некоторых случаях нет необходимости использования автоматизированных средств измерения. К тому же не всегда целесообразно применять программы измерения, а достаточно провести измерения на измерительной машине в ручном режиме;
- разработка правил для конструкторов по созданию трехмерных моделей. Такие правила помогут избежать появления ошибок в 3D-моделях, что значительно упростит работу с ними как для контрольно-измерительных операций, так и для других производственных процессов;
- разработка методики ведения электронного архива измерения изделий и анализа статистических данных. Внедрение электронного журнала, в связке с возможностями автоматизированного оборудования, позволит анализировать данные о контроле изделий с целью повышения эффективности работы оборудования, снижения затрат, брака, ошибок.

Автоматизация технологических процессов дает преимущества массового и единичного производства в виде быстрого изготовления крупного объема продукции и кастомизации с возможностью быстрой переналадки оборудования, что существенно повышает конкурентоспособность предприятия и позволит производить новые товары и занимать новые отраслевые рынки. Ввиду постоянного повышения кастомизации продукции проводить контроль качества нетипового продукта вручную или используя несовременное оборудование весьма проблематично. Отсюда появляется необходимость внедрения автоматизированных средств контроля и решения возникающих в связи с этим проблем.

## Литература

1. Решения для комплексной модернизации КИМ от компаний Delcam и Renishaw [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sapr.ru/article/23195>, своб.
2. Исаева И.В. Основные проблемы при внедрении автоматизированных систем управления предприятием // Современные наукоемкие технологии. – 2009. – № 10. – С. 54–55.

**Шорохов Сергей Александрович**

Год рождения: 1989

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
аспирантНаправление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,  
оптические и биотехнические системы и технологии

e-mail: stratumxspb@gmail.com

**Афанасьев Максим Яковлевич**

Год рождения: 1986

Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: amax@niuitmo.ru

УДК 004.102.768.01

**ПРИМЕНЕНИЕ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЕЙ В МОДУЛЬНОМ ПРОМЫШЛЕННОМ  
ОБОРУДОВАНИИ****Шорохов С.А.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Афанасьев М.Я.**

Работа выполнена в рамках темы НИР № 619296 «Разработка методов создания и внедрения киберфизических систем».

Концепция киберфизических производственных систем предполагает, что распределенная сеть должна соответствовать текущему производственному процессу и быть способной быстро реорганизовать его при возникновении изменений. С усложнением состава модульного оборудования, стандартная топология с одним центральным управляющим узлом в определенный момент становится неэффективной. В работе описано применение технологии ячеистой сети для обеспечения взаимодействия промышленных устройств и датчиков, входящих в состав модульного оборудования. Дано виртуальное развертывание сети и описание взаимодействия узлов сети, в том числе регистрация новых узлов в диспетчерском реестре.

**Ключевые слова:** ячеистые сети, киберфизические системы, модульное оборудование, топологии сетей, взаимодействие.

Понятие «цифровой двойник», применяемое в индустриальных киберфизических системах, описывает виртуальную модель производства, своего рода агрегатор данных о процессе производства и о самом продукте. Модель активно взаимодействует с физическими объектами; каждое изменение физического элемента производственной линии должно приводить к изменению в виртуальной модели, и наоборот [1]. Таким образом, киберфизическая система нуждается в надежной децентрализованной вычислительной сети, примером которой служит так называемая ячеистая сеть – топология, в которой узлы могут соединяться друг с другом и принимать на себя роль коммутатора. Очевидно, что обычная сетевая топология типа «звезда» не подходит для такого типа производственных систем. Она отлично работает для небольшого оборудования с несколькими датчиками и инструментами, однако, в случае увеличения числа соединений центральный сервер становится «узким местом» для всей сети. В качестве требований к используемой в модульном оборудовании архитектуре сети можно предъявить такие характеристики, как отказоустойчивость, возможность беспроводных

соединений, работа с IPv6-трафиком, безопасность соединений, открытый протокол связи. Технология беспроводных ячеистых сетей представляет собой наиболее подходящий вариант для распределенной производственной линии, поскольку отвечает большинству требований, перечисленных ранее.

Существует несколько основных технологий построения промышленной ячеистой сети, обзор которых представлен в таблице. Исходя из результатов анализа, наиболее подходящим является последний вариант. Стандарт IEEE 802.15.4 – промышленно-ориентированная технология, появившаяся относительно недавно; она имеет описание ячеистой сети и включает в себя две основные технологии: Zigbee и OpenThread. Zigbee является широко распространенным решением для промышленного интернета вещей и имеет более широкое сообщество разработчиков, но OpenThread более открыт, переносим, ориентирован на IPv6 и имеет поддержку систем на кристалле. Таким образом, OpenThread был выбран в качестве основы использования ячеистой сети на нашей платформе.

Таблица. Обзор технологий построения ячеистых сетей

Технология		Аргументы
IEEE 802.11 (Wi-Fi)	V	Хорошо известный стандарт. Возможность р2р-соединения с использованием хот-спотов
	X	Основан на Ethernet, т.е., возможна только «звезда». Необходимость ручной конфигурации адресов. Статический IP платный, а динамический требует наличия выделенного сервера
Интернет вещей на основе мобильной сети	V	Структура сети схожа с топологией ячеистых сетей [2]. Существует минимум три готовых решения: EC-GSM-IoT, LTE-M, NB-IoT
	X	Каждое устройство в сети требуется снабдить SIM-картой. Низкая пропускная способность. Зависимость от мобильного оператора. Стандарт 5G все еще находится в стадии разработки
IEEE 802.15.1 (Bluetooth, BLE)	V	Низкая стоимость оборудования. Встроенные алгоритмы безопасности. Возможность создания ячеистой сети описана официально
	X	Нет готовых решений. Проблемы с работой с IPv6-трафиком
IEEE 802.15.4 (ZigBee, OpenThread)	V	Возможность создания ячеистой сети описана официально. Работа с IPv6-трафиком. Открытость стандартов
	X	Относительно невысокая скорость. Малое расстояние передачи данных

Инструментарий OpenThread позволяет создавать виртуальную модель сети для тестирования и отладки. На рисунке показана топология ячеистой сети с двумя основными типами модулей: устройства полного и минимального взаимодействия (условно, Роутер и Датчик). К Роутерам относятся крупные модули, которые всегда держат связь с остальной сетью и содержат таблицы адресов IPv6. Датчики же передают данные диспетчеру в постоянном режиме или же по запросу. Вдобавок к этому, есть специфический тип узлов в сети, который с точки зрения сети является Датчиком, но обладающим возможностью маршрутизации и, если в сети менее 16 Роутеров, то они дополняют собой их количество.

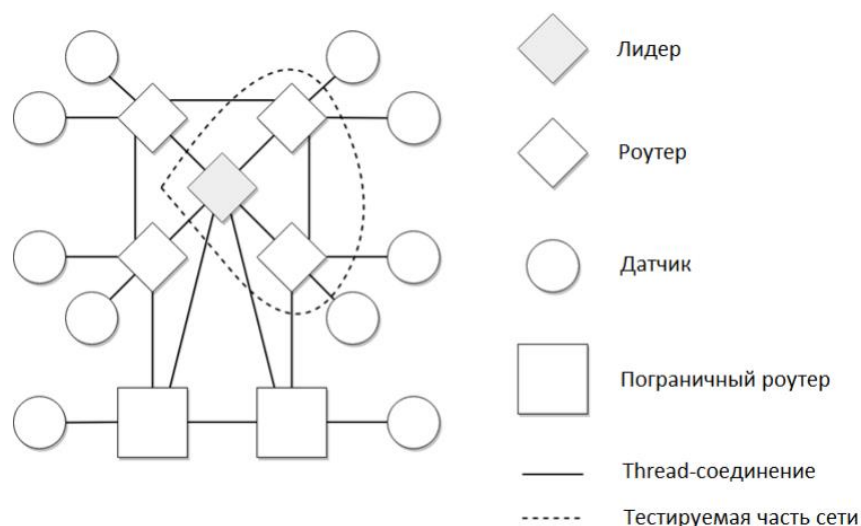


Рисунок. Топология сети

Виртуальная сеть была протестирована с помощью отладочного набора из репозитория OpenThread (<https://github.com/openthread/openthread>). Сеть запускается так называемым Лидером – Роутером, который включился первым. Лидер собирает и отправляет информацию о конфигурации сети. В сети может быть лишь один Роутер с данной ролью, и для обеспечения безопасности эта роль динамически передается от одного роутера к другому. Тестируемый участок сети служит для демонстрации изменения роли и состоит из одного Роутера с ролью Лидера и двух Датчиков с функционалом роутера. Когда система запускается, первый узел проверяет, включены ли другие маршрутизаторы, и получает статус Роутера и роль Лидера. Следующий узел видит, что в сети есть хотя бы один Роутер, и получает статус «Датчик», но после 2-минутного таймера переключает его на «Роутер». Таким образом, тестовая сеть пытается сохранить количество маршрутизаторов в диапазоне 16-23 (по спецификации OpenThread).

Модульное промышленное оборудование состоит из автономных компонентов, способных создавать устойчивые иерархические образования в зависимости от производственных задач. Поэтому такая гетерогенная сеть нуждается в сложном протоколе связи. В сетевом протоколе для разработки платформы модули объединяются вокруг одного с ролью диспетчера. Как минимум, один модуль в сети должен сохранять роль диспетчера, и, чаще всего, это трехкоординатное шасси, поскольку оно является обязательным модулем в каждой единице оборудования. Модуль-диспетчер является частью распределенного хранилища и имеет реестр с JSON-файлами. Каждый JSON-файл описывает один модуль из ближайшего окружения с набором параметров: имя модуля, его адрес, функции и возвращаемые значения [3]. Совокупность всех реестров формирует «цифровой двойник», который хранится в облаке.

Что касается вопроса о регистрации нового модуля в сети, то с виртуальной точки зрения это передача JSON с последующей записью в распределенное хранилище. С физической же точки зрения каждый модуль подключен через трехпроводной интерфейс, где один из проводов представляет собой так называемую линию безопасности. Линия безопасности соединяет модули по схеме «монтажное И» и основной задачей линии безопасности является регистрация аварийных ситуаций. Но на этапе инициализации модулей можно использовать линию безопасности для регистрации нового модуля. При подключении новый модуль переключает всю линию в низкий уровень, диспетчер видит это и отправляет запрос новому модулю на переключение линии безопасности на высокий уровень. Если уровень изменился, то модуль считается подключенным к диспетчеру и может быть зарегистрирован в сети.

Подводя итог всему вышесказанному, можно сказать, что применение ячеистых сетей позволяет легко конфигурировать производственные площади, каждый блок оборудования будет подключен только к электрической сети. Кроме того, развитие промышленной сети должно быть направлено на сокращение количества проводов [4]. Кроме того, есть несколько вопросов, которые необходимо решать дополнительно: во-первых, небольшая дальность передачи модулей, во-вторых, обеспечение безопасности, поскольку использование спецификации описывает только физический слой модели OSI, и, наконец, определение используемого частотного диапазона.

### Литература

1. Graf U., Heidel R. and Kadel D.G. Discussion paper. Networkbased communication for Industrie 4.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/network-based-communication-for-i40.pdf>, своб.
2. Neumann A., Wisniewski L., Ganesan R.S., Rost P. and Jasperneite J. Towards integration of industrial ethernet with 5G mobile networks // 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). – 2018. – № 1. – P. 1–4.
3. Afanasev M.Y., Fedosov Y.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A. Performance Evaluation of the Message Queue Protocols to Transfer Binary JSON in a Distributed CNC System // Proceedings of 2017 15th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). – 2017. – P. 357–362.
4. Colpo J. and Mols D. No strings attached // Hydrocarbon Engineering. – 2011. – V. 16. – P. 47–52.



**Ювшин Александр Михайлович**

Год рождения: 1993

Университет ИТМО, факультет систем управления и роботехники,  
аспирантНаправление подготовки: 12.06.01 – Фотоника, приборостроение,  
оптические и биотехнические системы и технологии

e-mail: yuvshin.alex@yandex.ru

**Андреев Юрий Сергеевич**

Год рождения: 1984

Университет ИТМО, факультет систем управления и роботехники,  
к.т.н., доцент

e-mail: ysandreev@corp.ifmo.ru

**УДК 678****РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО  
ТРУБЧАТОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИМЕРНОГО  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА****Ювшин А.М.****Научный руководитель – к.т.н., доцент Андреев Ю.С.**

В работе проведена классификация трансформируемых конструкций и элементов для космических аппаратов, проведено сравнение технологий изготовления трансформируемого элемента из термопластичного и термореактивного полимерного композиционного материала.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, термопласты, трансформируемые конструкции.

**Введение.** С начала исследования космоса инженеры столкнулись с проблемой эффективной упаковки приборов и инструментов, для исследования космического пространства, в замкнутом и ограниченном объеме космического аппарата, а также их оперативного и точного выведения за его пределы. В связи с этим инженерами и конструкторами были придуманы и разработаны трансформируемые конструкции [1].

Трансформируемые конструкции – это вид конструкций, которые могут изменять свою конфигурацию в автономном режиме. Изменение конфигурации представляет собой переход от компактной формы к развернутой. Переход от компактной к развернутой форме можно сравнить с раскрытием зонта, или с открытками, изготовленными по технике киригами. Трансформируемые конструкции используются в составе космических аппаратов (КА) в качестве несущих конструкций солнечных батарей, парусов, систем ориентации спутника, антенн, рефлекторов и других инструментов, работающих за пределами КА. Трансформируемые конструкции, в свою очередь, состоят из трансформируемых элементов, к которым предъявляются следующие требования, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Требования, предъявляемые к трансформируемым элементам

Требование	Значение
Погонная масса элемента, кг/м	около 0,1
Масса полезной нагрузки, кг	от 10 до 50
Температура эксплуатации, °С	от –150 до +150
Коэффициент упаковки	0,01–0,02

Требование	Значение
Длина в развернутом состоянии, м	от 10 до 50
Изгибающий момент, Н×м	4
Стойкость к радиационному и ультрафиолетовому излучению	Высокая

Исходя из предъявляемых требований, была проведена классификация трансформируемых конструкции и элементов, представленная в табл. 2.

Таблица 2. Классификация трансформируемых конструкций и элементов

Вид трансформируемой конструкции	Тип трансформируемого элемента	Подтип трансформируемого элемента	Коэффициент упаковки	Длина трансформации, м	Масса полезной нагрузки, кг	Достоинства/Недостатки
Линейная	Стержни		0,02	1–100	более 50*	– простота изготовления; – низкая точность ориентации во время развертывания; – необходимо активное управление процессом трансформации
		Спиральные стержни	0,02	1–100	около 50*	
	Трубчатые элементы	Трубы из ПКМ с памятью формы	0,05	1–2	1	– низкая масса; – отсутствие активного управления трансформацией; – проблемы с термической стабильностью
		Тонкостенные трубы с небистабильными свойствами	0,02	1–40	1–50	– низкая масса; – высокая жесткость; – отсутствие активного управления трансформацией
		Трубы с бистабильными свойствами	0,02	1–40	1–50	– низкая масса; – отсутствие активного управления трансформацией
Трубы с нейтрально стабильными свойствами	0,02	1–40	1–50	– имеют все преимущества описанных выше труб; – необходимо активное		

Вид трансформируемой конструкции	Тип трансформируемого элемента	Подтип трансформируемого элемента	Коэффициент упаковки	Длина трансформации, м	Масса полезной нагрузки, кг	Достоинства/ Недостатки
						управление процессом трансформации
	Телескопические трубы		0,1	1–10	около 50	– высокая жесткость; – высокая масса; – необходимо активное управление процессом трансформации
	Ферменные элементы		0,7	около 100	менее 100	– обычно ее масса и жесткость подходит под определенное применение, но данные трубы механически сложны и также вместе с этим добавляется проблема трения в местах соединения (шарнирах)
Поверхностные	Пантографы		0,1–0,3	10–80	менее 100	– сложность в изготовлении; – высокая масса
	Кольцевые пантографы		0,1–0,3	10–40	55	– сложность в изготовлении; – высокая масса
	3D-элементы		0,2–0,3	1–10	–	– сложность в изготовлении; – высокая масса
Объемные	Надувные элементы		0,02	1–50	10	– небольшая масса; – необходимость иметь запас газа для поддержания давления; – высокая вероятность утечки газа из-за повреждения метеоритами

\*в составе конструкции.

В соответствии с предъявляемыми требованиями для разработки технологии изготовления был выбран трубчатый элемент с небистабильными свойствами в связи его большими преимуществами по сравнению с другими элементами. Механика трансформации данного типа трансформируемого элемента заключается в линейно-эластичном состоянии полимерного композиционного материала (ПКМ), которое реализуется при помощи определенной структуры армирования [2]. На данный момент проводятся расчеты геометрии выбранных форм поперечного сечения (рис. 1) по обеспечению предъявляемых требований.

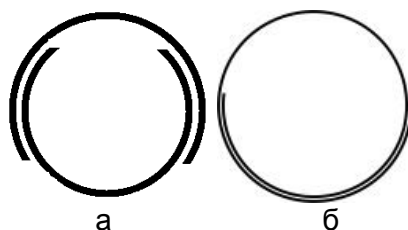


Рис. 1. Трубчатые элементы: с перекрывающим сечением, состоящим из двух полукруглых половинок (а); с перекрывающим сечением в виде спирали (б)

В качестве материала изготовления профиля был выбран ПКМ в связи с его следующими преимуществами:

- низкая масса;
- высокие механико-прочностные характеристики;
- эксплуатационные характеристики, удовлетворяющие требованиям.

Проведя анализ технологий изготовления трансформируемых трубчатых элементов, было выявлено две основные технологии изготовления использующих терморезактивный ПКМ [3, 4]. Это вакуумная инфузия с выкладкой препрега на оправку и с последующим отверждением в печи или автоклаве (рис. 2).

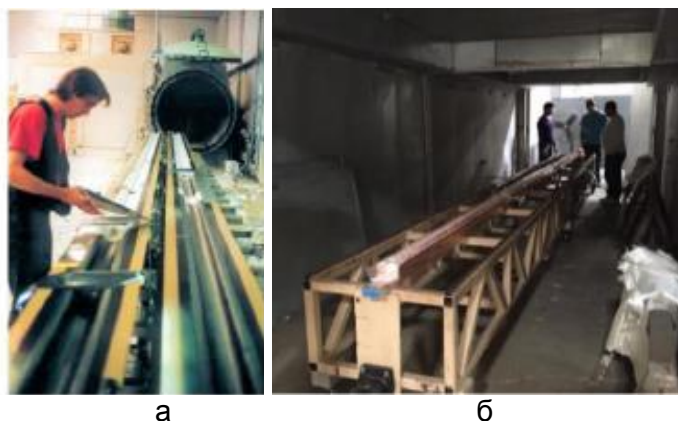


Рис. 2. Вакуумная инфузия с последующим отверждением в автоклаве (а) и в печи (б)

В рамках обеспечения требований, предъявляемых к трубчатым элементам и выявленных технологий изготовления в качестве полимерного связующего, был выбран термопластичный суперконструкционный полимер полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) [5–7] в связи с его высокими эксплуатационными характеристиками, не уступающими эпоксидным связующим, традиционно используемым в аэрокосмической отрасли, а также со следующими ограничениями технологий, использующих терморезактивное связующее:

- ограничение по длине изготавливаемого трубчатого элемента, длина ограничивается формообразующей оправкой и размерами печи или автоклава;
- низкая производительность из-за применения ручной выкладки терморезактивного препрега на оправку;
- отсутствие стабильности в качестве получаемого трубчатого элемента. Качество определяется человеческим фактором;
- высокая стоимость изготовления из-за применения автоклава и печи.

Применение термопластичного полимерного связующего позволит автоматизировать процесс изготовления трубчатого элемента, получать элемент большей длины из-за возможности применения таких традиционных технологий как профилирование. Качество трубчатого элемента будет зависеть от правильно выбранных технологических параметров процесса [8, 9].

**Выводы.** На данный момент проводится расчетный анализ и компьютерное моделирование геометрии выбранных трубчатых элементов для выявления обеспечения требованиям по механико-прочностным характеристикам и выбора наилучшего из них. Также проводится анализ по выбору применяемого армирующего наполнителя и схемы армирования для обеспечения механизма трансформации. Следующим этапом планируется создание оборудования для изготовления экспериментального образца трубчатого профиля и его испытания на растяжение, сжатие и изгиб.

### Литература

1. Conley P.L. Space vehicle mechanisms. – New York: John Wiley & Sons, INC, 1997. – 769 p.
2. Пат. EP 0 891 248 B1 Европа, МПК B29C 61/06, B65G 15/08. An extendible member / Daton-Lovett, Andrew, James. Оpubл. 25.03.1997.
3. Fernandez J.M. Advanced deployable shell-based composite booms for small satellite structure applications including solar sails [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/313889971\\_Advanced\\_Deployable\\_Shell-Based\\_Composite\\_Booms\\_for\\_Small\\_Satellite\\_Structural\\_Applications\\_Including\\_Solar\\_Sails](https://www.researchgate.net/publication/313889971_Advanced_Deployable_Shell-Based_Composite_Booms_for_Small_Satellite_Structural_Applications_Including_Solar_Sails), своб.
4. Herbeck L., Eiden M., Leipold M., Sickinger C., Unkenbold W. Development and Test of Deployable Ultra-Light Weight CFRP Boom for a Solar Sail [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/234494867\\_Development\\_and\\_Test\\_of\\_Deployable\\_Ultra-Lightweight\\_CFRP-Booms\\_for\\_a\\_Solar\\_Sail](https://www.researchgate.net/publication/234494867_Development_and_Test_of_Deployable_Ultra-Lightweight_CFRP-Booms_for_a_Solar_Sail), своб.
5. Wypych G. Handbook of Polymers. – 2nd ed. – Toronto: ChemTec Publishing, 2016. – 712 p.
6. McKee L.W. The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers. – 3rd ed. – Elsevier, 2013. – 400 p.
7. Бабич Л.Н., Бородин Ю.В. Перспективные полимерные материалы, используемые для радиационной защиты // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции. – 2015. – С. 261–262.
8. Pellegrino S. Deployable structures. – New York: Springer-Verlag Wien GmbH, 2001. – 360 p. Ozan O., Ozarslan Y. Video lecture watching behaviors of learners in online courses // Educational Media International. – 2016. – V. 53. – P. 27–41.
9. Pluig L., Barton A., Rando N. A review Large deployable structures for astrophysics missions // Astro Astronautica. – 2010. – V. 67. – P. 12–26.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Направление «БЕЗОПАСНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».....</b>	<b>4</b>
<b>Большаков В.О.</b> Исследование плазмонного резонанса наночастиц серебра на поверхности кремния .....	5
<b>Гайфулина Д.А., Хаванская Э.Р.</b> Исследование методов машинного обучения в задаче классификации веб-страниц для выявления нежелательной информации в сети интернет.....	8
<b>Гайфулина Д.А.</b> Методика анализа трафика среды передачи данных в киберфизических системах для выявления сетевых аномалий.....	14
<b>Калинкина М.Е., Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Мамин А.Р., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л.</b> Актуальные проблемы разработки и эксплуатации отечественной микрофонной техники на основе проведенных патентных исследований.....	20
<b>Калинкина М.Е., Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И., Ткалич В.Л.</b> Обеспечение стабильности работы акселерометра за счет балансировки и корректировки гиросtabilизированной платформы при широком диапазоне влияния внешних факторов.....	25
<b>Кляус Т.К.</b> Оценка экономической эффективности систем защиты информации.....	29
<b>Минаева Т.А., Волошина Н.В.</b> Анализ эффективности многоуровневого встраивания при использовании помехоустойчивых кодов разной длины.....	34
<b>Мищенко Н.К.</b> Способ идентификации ELF-файлов на основе классификатора Байеса... ..	38
<b>Чупров С.С., Виксин И.И., Ким Ю.В., Усова М.А.</b> Задачи безопасного проезда перекрестков беспилотными транспортными средствами в мобильной робототехнической системе с децентрализованным управлением.....	43
<b>Направление «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И РОБОТОТЕХНИКИ» .....</b>	<b>49</b>
<b>Борботько В.А., Помпеев К.П.</b> Совершенствование методики расчета промежуточных диаметральных размеров .....	50
<b>Бурков Н.Ю.</b> Исследование и разработка системы автоматизированного проектирования печатных плат на базе интернет-приложения.....	53
<b>Вертегел Д.А.</b> Прецизионный электропривод на базе многофазной машины переменного тока с пространственно-векторной модуляцией.....	56
<b>Гибадуллин И.Н.</b> Исследование взаимосвязи микрогеометрии поверхности детали с ее функциональными свойствами .....	62
<b>Гопанков Д.Н. (Университет ИТМО), Евстифеев М.И. (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»).</b> Исследование возможности использования быстрого прототипирования для создания аппаратуры внутрикорабельной связи ...	66
<b>Григорьев И.С.</b> Исследование линейно-квадратичных регуляторов в системах управления следящим модульным приводом высокоточных робототехнических систем.....	70
<b>Данг Нян Тхонг, Чан Минь Хуан, Тимофеев Б.П.</b> Увеличение коэффициента перекрытия приближенного зубчатого зацепления за счет контактной деформации.....	76
<b>Зенкин А.М., Осинкин Е.А., Пачковский К.А.</b> Детектирование границ пожара по камере на вычислительных мощностях беспилотного летательного аппарата.....	81
<b>Зенкин А.М., Пачковский К.А., Осинкин Е.А.</b> Моделирование квадрокоптера Iris в симуляторе Gazebo с дальнейшим синтезом PID регулятора по высоте.....	84
<b>Зименко К.В.</b> Исследование и разработка программного модуля планирования и оптимизации перемещения исполнительного устройства установки селективного отверждения фотополимеров .....	89

<b>Зименко К.В.</b> Система получения электронно-геометрической модели детали с параллельным созданием ее параметрической модели .....	93
<b>Истомин В.А.</b> Идентификация и учет параметров модели погрешностей триады волоконно-оптических гироскопов .....	97
<b>Карпова М.В.</b> Конструктивные методы уменьшения погрешности индукционных преобразователей угла .....	102
<b>Касаткин А.Н.</b> Применение неразрушающих методов контроля в выявлении физиологии дыхания .....	106
<b>Крылова А.А.</b> Перспективы применения голосовых ассистентов для сбора данных в индустриальных киберфизических системах .....	110
<b>Куприянов Д.В.</b> Вопросы мотивации и самоорганизации студентов .....	116
<b>Малашенков К.С.</b> (Университет ИТМО), <b>Елисеев Д.П.</b> (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»). Анализ возможности применения аддитивных технологий при проектировании приборов навигации .....	118
<b>Осинкин Е.А., Пачковский К.А., Зенкин А.М.</b> Монокулярный алгоритм построения карты и локализации беспилотного летательного аппарата .....	122
<b>Павлова М.В., Послянова О.Н.</b> Технологические методы обеспечения поверхностной проводимости ротора шарового гироскопа .....	126
<b>Плешков А.А., Помпеев К.П.</b> К вопросу автоматизации синтеза линейных размерных схем и расчета технологических размерных цепей .....	130
<b>Поволоцкий Я.А.</b> Разработка распределенной системы промышленной автоматизации на базе протокола Modbus/TCP .....	135
<b>Савенко Р.В.</b> Обеспечение автономной гиростабилизации оптического указателя глиссады .....	138
<b>Слукина М.И.</b> (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»). Идентификация параметров температурной погрешности двухстепенного поплавкового гироскопа методами нелинейной фильтрации .....	143
<b>Титов Р.У.</b> (Университет ИТМО), <b>Моторин А.В.</b> (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»). Определение препятствий и дальностей до них в алгоритмах одновременной навигации и картографирования .....	146
<b>Торопова М.А. Агаева А.А.</b> Исследование точности оценивания аномалии силы тяжести в зависимости от внешних факторов .....	149
<b>Хассо М.А.,</b> (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), <b>Евстифеев М.И.</b> (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»). Анализ конструкции измерителя угловых деформаций подвижного объекта с отечественными волоконно-оптическими гироскопами .....	152
<b>Чалков В.В.</b> (Университет ИТМО; АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), <b>Шевченко А.Н.</b> (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»). Определение параметров магнитного экрана квантового датчика вращения на основе анализа формы параметрического резонанса цезия .....	157
<b>Чукичев А.В., Андреев Ю.С.</b> Особенности внедрения средств автоматизированного контроля в условиях приборостроительного предприятия .....	161
<b>Шорохов С.А.</b> Применение ячеистых сетей в модульном промышленном оборудовании .....	164
<b>Ювшин А.М.</b> Разработка технологии изготовления трансформируемого трубчатого элемента из термопластичного полимерного композиционного материала .....	168

**АЛЬМАНАХ НАУЧНЫХ РАБОТ  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ УНИВЕРСИТЕТА ИТМО  
Том 2**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Редактор

Л.Н. Точилина

Подписано к печати 10.10.2019

Заказ № 4237

Тираж 100 экз.