

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Institute of Hydrodynamics Academy of Sciences of the Czech Republic  
Ангарская государственная техническая академия  
Астраханский государственный технический университет  
Белгородский государственный технологический университет  
Белорусский государственный аграрный технический университет  
Белорусский государственный университет  
Белорусский государственный технологический университет  
Белорусский национальный технический университет  
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Донской государственный технический университет  
Ивановский государственный химико-технологический университет  
Институт вычислительной математики РАН  
Институт проблем управления РАН  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Московский политехнический университет  
Пензенская государственная технологическая академия  
Российский химико-технологический университет  
Рязанский государственный радиотехнический университет  
Самарский государственный технический университет  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
Тамбовский государственный технический университет  
Тверской государственный технический университет  
Ярославский государственный технический университет

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

СБОРНИК ТРУДОВ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 8

Санкт-Петербург  
Издательство Политехнического университета  
2018

УДК 004+51.7+519.6

ББК 22.1:32.81

М34

**Математические методы в технике и технологиях:** сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 8 / под общ. ред. А. А. Большакова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. - 100 с.

В сборнике публикуются труды участников XXXI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях», которая состоится в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (техническом университете), Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации РАН (г. Санкт-Петербург, 10–14 сентября 2018 г., посвящена 190-летию СПбГТИ(ТУ)); в СГТУ имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, 20-21.09.2018г.); в БГАТУ, БГТУ, БНТУ, БГУ, БГУИР (г. Минск, Беларусь, 8-12 октября 2018г.). Представленные материалы отражают современные направления математического и компьютерного обеспечения для решения фундаментальных проблем, связанных с синтезом и применением математических моделей технологических, технических и организационно-технических систем.

Сборник предназначен для специалистов, занимающихся использованием математических методов в технике и технологиях.

Доклады рецензированы и отрецензированы редакционной коллегией конференции ММТТ-31.

Редакционная коллегия:

Главный редактор: д-р техн. наук, проф. *А. А. Большаков*

Заместители главного редактора: д-р техн. наук, проф., проф. *В. С. Балакирев*; д-р техн. наук, проф., проф. ТГТУ *С. И. Дворецкий*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. КНИТУ *Н. Н. Зиятдинов*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. СПбГТУ (ТИ) *Т. Б. Чистякова*.

Члены редакционной коллегии: д-р техн. наук, проф., ВГУ *Г. В. Абрамов*; д-р техн. наук, проф. зав. кафедрой КГАСУ *Ф. Г. Ахмадиев*; д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Института проблем химической физики РАН *В. Н. Бабак*; д-р техн. наук, проф., МГТУ имени Н.Э. Баумана *Т. И. Булдакова*; д-р наук, проф., вед. научн. сотр., председатель Совета Института гидродинамики Чешской Академии наук *П. Власак*; д-р техн. наук, проф. ЮФУ *А. Р. Гайдук*; д-р техн. наук, проф., зам. директора филиала НИУ «МЭИ» в г. Смоленске *М. И. Дли*; д.ф.-м.н., проф. ТвергТУ *А. Л. Калабин*; д-р техн. наук, проф., директор института АстрГТУ *И. Ю. Квятковская*; д-р техн. наук, проф. СГТУ имени Гагарина Ю.А. *В. А. Коломейцев*; д-р техн. наук, проф. ВолгТУ *А. Г. Кравец*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИГХТУ *А. Н. Лабутин*; д-р техн. наук, проф., зав. каф. СамГТУ *М. Ю. Лившиц*; академик РАН, д-р техн. наук, проф., директор института РХТУ имени Д. И. Менделеева *В. П. Мешалкин*; д-р техн. наук, проф. ДГТУ *Р. А. Нейдорф*; д-р техн. наук, проф. НИУ «МЭИ» *О. М. Проталинский*; чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. лаб. Института проблем точной механики и управления РАН *А. Ф. Резчиков*; д-р техн. наук, проф. СГТУ имени Гагарина Ю.А. *М. Ф. Степанов*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВолгГТУ *И. В. Степанченко*; академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., директор Института вычислительной математики РАН *Е. Е. Тыртышников*; д-р техн. наук, проф. АГТУ *А. А. Ханова*; д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВолгГТУ *М. В. Щербаков*.

Ответственный редактор: канд. техн. наук, доц., доцент Московского Политеха *Д. В. Зубов*.

Технический редактор: *С. А. Большакова*

Сборник издан при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-20081 Г).

© Большаков А. А., научное редактирование, 2018  
© Издатель. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018  
© Издатель. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2018

УДК 004.01

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУР ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТИПОВЫХ ПРОГРАММ ДИАГНОСТИКИ КОТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**В.Д. Белов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, Пермь,  
vladislav.belov.199@yandex.ru

*Аннотация.* Рассмотрено использование котельных установок в теплоэнергетике, основные проблемы, с которыми сталкиваются специалисты, проводящие диагностику котельного оборудования, предложены модели, позволяющие формализовать процедуры процесса формирования типовых программ диагностики котельного оборудования.

*Ключевые слова:* котельная установка, типовая программа диагностики, функциональная модель, геометрическая модель, формуляр, информационная модель.

## **MODELING OF PROCEDURES FOR THE FORMATION OF TYPICAL DIAGNOSTIC PROGRAMS OF BOILER EQUIPMENT**

**V.D. Belov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Perm national research polytechnic university, Russia, Perm, vladislav.belov.199@yandex.ru

*Abstract.* The use of boiler units in heat and power engineering is considered, the main problems faced by specialists conducting diagnostics of boiler equipment are discussed, models that allow to formalize the procedures for the formation of typical diagnostic programs for boiler equipment are proposed.

*Keywords:* boiler unit, a typical diagnostic program, a functional model, a geometric model, a form, an information model.

В современной мировой энергетике основную долю выработки электроэнергии составляют тепловые электростанции (ТЭС). ТЭС получили широкое распространение благодаря возможности дешево транспортировать органическое топливо с места добычи на электростанцию, которая размещается вблизи потребителя; возможности отпускать потребителю не только электроэнергию, но и тепловую энергию (с водяным паром или горячей водой) — такие электростанции называются теплоэлектроцентрали (ТЭЦ); относительно невысокой стоимости оборудования; низкой по сравнению с атомными электростанциями опасностью производства.

Одним из видов теплоэнергетического оборудования, от технического состояния которого существенно зависит экономическая эффективность работы тепловых электростанций, являются котельные установки (КУ). КУ включает котел, топочное устройство, пароперегреватели, экономайзер, воздухоподогреватель, каркас с площадками обслуживания, обмуровку, арматуру, газоходы, тепловую изоляцию, а также вспомогательное оборудование: дутьевые вентиляторы, дымососы, питательные, подпиточные и циркуляционные насосы, системы топливопередачи, золоулавливания и шлакоудаления, газоходы котельной и дымовую трубу.

На практике контроль технического состояния КУ осуществляют на основе инженерно-технического мероприятия, называемого техническим диагностированием (ТД).

Диагностирование КУ осуществляется в период эксплуатации, по окончании срока эксплуатации, а также после произошедшей аварии и включает, например, следующие процедуры: анализ проектной и эксплуатационной документации, внешний и внутренний визуальный осмотры, контроль металла основных элементов оборудования неразрушающими методами, проведение гидравлических испытаний. Количество и объём диагностических процедур зависит от конкретных условий

эксплуатации КУ и прописывается в программе контроля, разрабатываемой инженерно-техническим персоналом индивидуально для каждого технического устройства на основе нормативно-технической документации [1].

Формирование программ контроля КУ является сложным организационно-технологическим процессом, требующим принятия интеллектуальных решений, серьёзной проработки нормативно-технической документации [2, 3] и практического опыта. Указанные условия делают формирование программ контроля чрезвычайно трудоёмким и долговременным процессом, при этом качество программ контроля получается достаточно низким.

Процесс формирования типовых программ можно усовершенствовать, разработав и применив специальную программную систему или программный модуль. Однако проведённый литературный анализ не выявил моделей, с использованием которых можно разработать и программно реализовать алгоритмы формирования таких программ диагностики.

Исходя из вышеуказанного, целью настоящего исследования являлась разработка моделей, формализующих устройство КУ и процедуры формирования программ контроля.

Для достижения заявленной цели поставлены следующие задачи:

осуществить анализ паспортно-технической документации по КУ и разработать по результатам анализа информационную и геометрическую модели;

осуществить анализ нормативно-технической и эксплуатационной документации и разработать по результатам анализа функциональную модель формирования программ контроля как организационно-технологического процесса.

Анализ нормативной и паспортно-технической документации на котлы показал, что для составления информационной модели, котел необходимо рассматривать как структурную часть предприятия (ТЭС). На рис. 1 представлена информационная модель котла. Характеристики отдельного элемента модели включают проектно-конструкторскую, технологическую, экономическую и иную информацию. Информационная модель котла содержит необходимые для разработки программы контроля данные, а также формирует основу для принятия решений на протяжении всего жизненного цикла оборудования.

В структуру ТЭС входят предприятия, разделенные на энергоблоки, которые включают в себя отдельные энергоустановки. В одну установку может входить более одного котла. Геометрическая модель элемента КУ – формуляр – представляет схематичное изображение данного элемента посредством графических примитивов. На одну КУ составляется, как правило, более десятка формуляров. На рис. 2 представлен формуляр экономайзера котла. Формуляр элемента необходим для удобства работы с программой диагностики, на нем указывается основная информация об элементе: название, номер чертежа, типоразмер элементов, входящих в формуляр (трубы, фланцы и прочее), а также их количество, количество и места расположения сварных стыков, дополнительные примечания (названия, высотные отметки и другие). Задания на контроль, предусмотренные программой диагностики, заносятся в формуляр, после чего специалист, проводящий диагностику, может напечатать формуляр и провести требуемый контроль элементов, указанных в формуляре.

Процесс формирования программы диагностики элемента КУ можно показать с помощью методов функционального моделирования. На рис. 3 показана функциональная модель процесса формирования программ диагностики как организационно-технологического процесса.

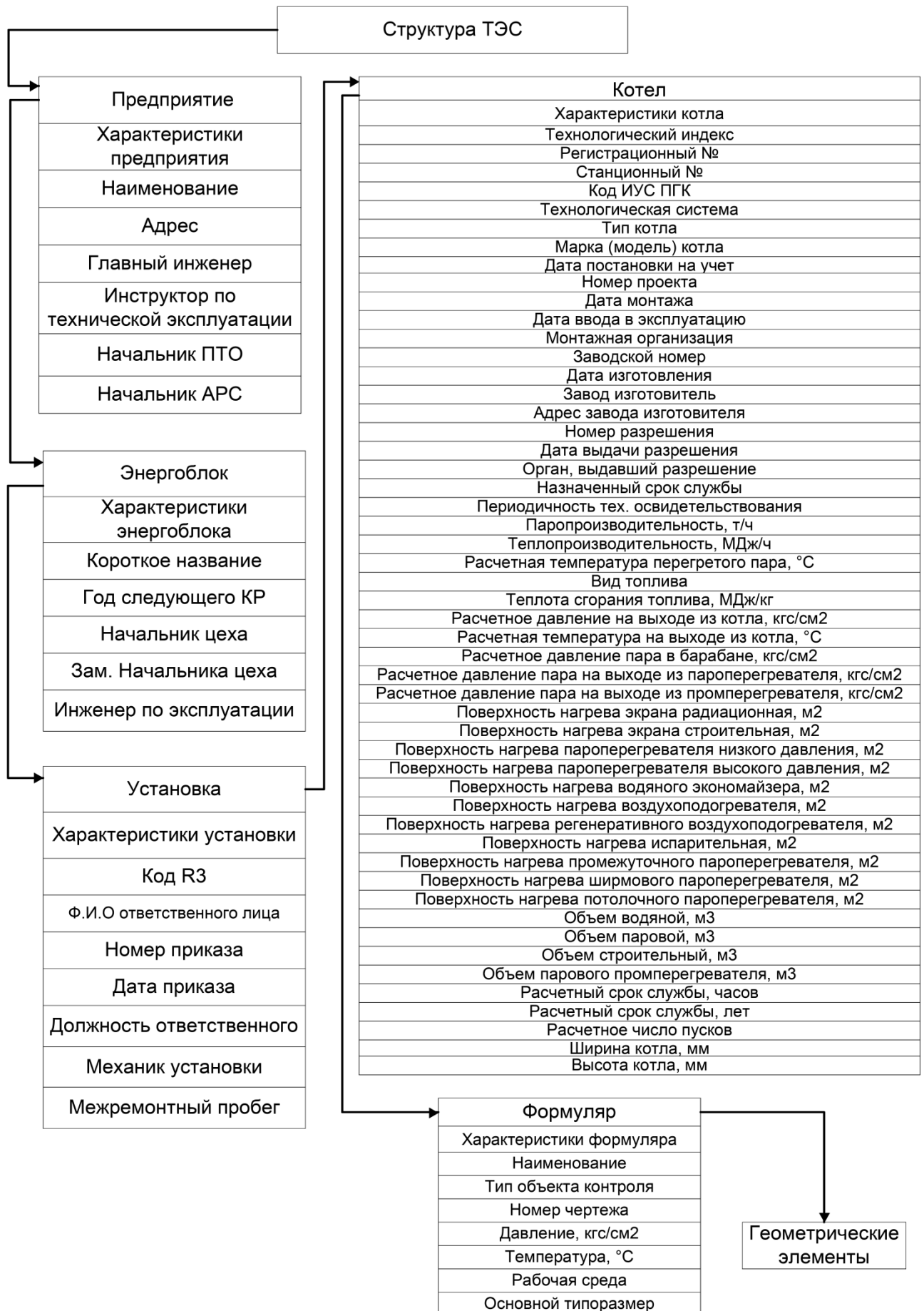


Рис. 1. Информационная модель котельной установки



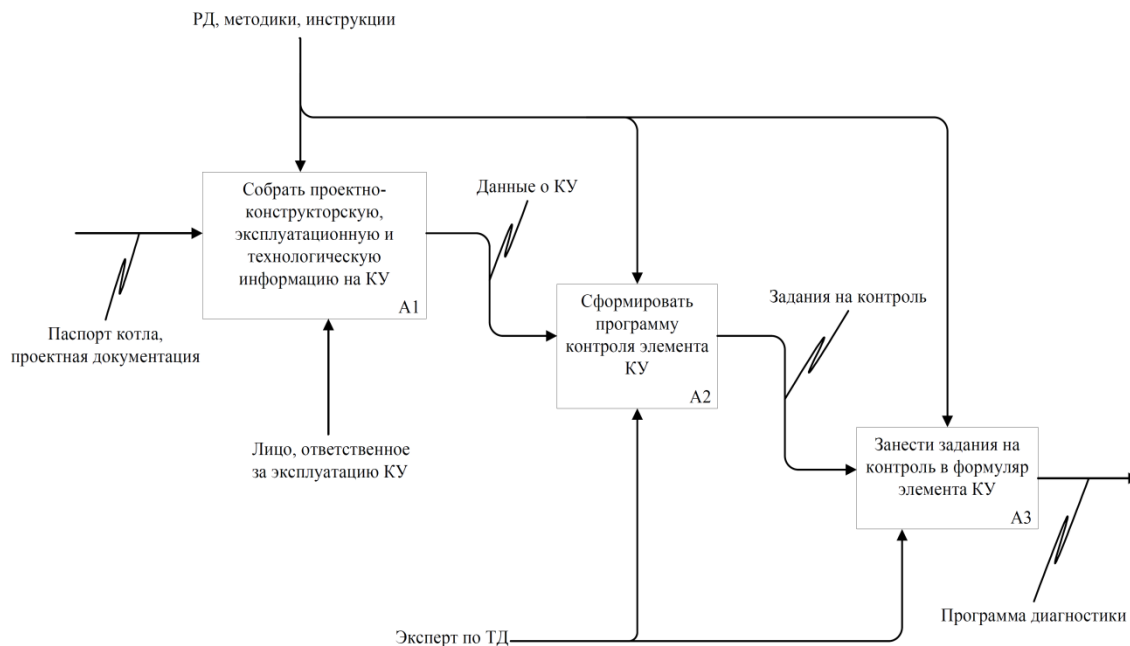


Рис. 3. Функциональная модель формирования программ диагностики как организационно-технологического процесса

Для формирования программы контроля необходимы следующие данные об элементе КУ: тип элемента, основной материал, типоразмер элемента, рабочее давление, рабочая температура, толщина стенки элемента, группа и категория (для трубопроводов), а также данные о предыдущих ТД и авариях (если были). Сформированная программа контроля состоит из заданий на контроль отдельных участков элемента, а также сварных швов. В заданиях на контроль содержится метод и объем контроля и количество участков, которые должны быть проконтролированы. Готовая программа диагностики состоит из формуляра элемента КУ и заданий на контроль.

На основе результатов анализа нормативно-технической, эксплуатационной и паспортно-технической документации на котельную установку составлены информационная модель котельной установки, геометрическая модель экономайзера котла, функциональная модель процесса формирования программ контроля. Представленные модели позволяют формализовать процедуры формирования программ диагностики котельного оборудования, что позволяет усовершенствовать процесс формирования программ диагностики.

#### Библиографический список

1. Беляев С.А., Литвак В.В., Солод С.С. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС. Томск: Изд-во НТЛ. 2008. 218 с.
2. РД 34.17.435-95 Типовая Инструкция По Контролю Металла и Продлению Срока Службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. М. 2003. 54 с.
3. РД 10-577-03 Техническое диагностирование котлов с рабочим давлением до 4,0 МПа включительно. Методические указания. М. 1995. 35 с.

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ОТРАЖАТЕЛЬНУЮ ИЗОЛЯЦИЮ

В.А. Кузьмин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЦСА ИПС им. А.К. Айламазяна РАН,

Россия, Ярославская область, г. Переславль-Залесский, kuba@kuba.pereslav.ru

<sup>2</sup>АО «Завод ЛИТ», Россия, Ярославская область, г. Переславль-Залесский, lte@zavodlit.ru

*Аннотация.* Изложены модели, алгоритмы и структура комплекса программ, который позволяет проводить расчет многослойных ограждающих конструкций, содержащих отражательную изоляцию и воздушные прослойки.

*Ключевые слова:* отражательная теплоизоляция, проектирование ограждающих конструкций, теплотехнический расчет, программа для расчета теплотехники ограждающих конструкций, утепление.

## ALGORITHMS AND SOFTWARE ANALYSIS OF BUILDING ENCLOSURES CONTAINING REFLECTIVE INSULATION

Kuzmin Vasilij Alexandrovich<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>PSI RAS, Program Systems Institute, Russia, Pereslavl-Zalessky, kuba@kuba.pereslav.ru

<sup>2</sup>AO «Zavod LIT», Russia, Pereslavl-Zalessky, lte@zavodlit.ru

*Abstract.* The models, algorithms and structure of the program complex, which allows to calculate multilayer enclosing structures containing reflective radiation and air layers, are presented.

*Keywords:* reflective thermal insulation, design of enclosing structures, thermal calculation, program for the calculation of thermal engineering of enclosing structures, insulation.

**Введение.** Широкое распространение архитектурных проектов, использующих авторские решения, сжатые требования к выполнению проектных работ, необходимость контроля соблюдения действующих строительных норм и правил диктует необходимость использования набора автоматизированных приложений, помогающих выполнять технические расчеты согласно нормативно-технической документации, избежать ошибок и значительно сократить время создания проекта. В связи тенденцией к применению новых материалов, повышением стоимости энергоресурсов и пристального внимания к проблеме теплового загрязнения является актуальной задача расчёта тепловой защиты зданий и сооружений. Перспективным методом повышения энергоэффективности является использования отражательной изоляции, которая позволяет при малой стоимости, ничтожном собственном объёме достичь в ряде случаев существенной экономии тепловой энергии.

**Цель работы.** В настоящее время в Российской Федерации действуют следующие нормативные документы в рассматриваемой нами области: СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» и, вступивший в действие в июне 2016 года, ГОСТ Р 56734-2015 «Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражательной теплоизоляцией». Основные физические закономерности, изложенные в упомянутых методиках, описаны в работах В.Н. Богословского [2, 3, 4]. Нами поставлена и успешно достигнута цель создания комплекса прикладных программ для проектирования энергоэффективных ограждающих конструкций. Комплекс пакетов прикладных программ LIT THERMO ENGINEER получил свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014617857 и успешно применяется на практике (см. рис. 1).

Для достижения поставленной цели поставлены задачи

– разработка на основе экспериментальных данных модели процесса теплопередачи через воздушную прослойку, содержащую отражательную изоляцию;

– разработка алгоритмов расчёта термических сопротивлений типовых слоёв строительных материалов и реализация интерфейса для их использования.

**Основная часть.** Рассмотрим основные уравнения модели передачи тепла через теплоизоляцию.

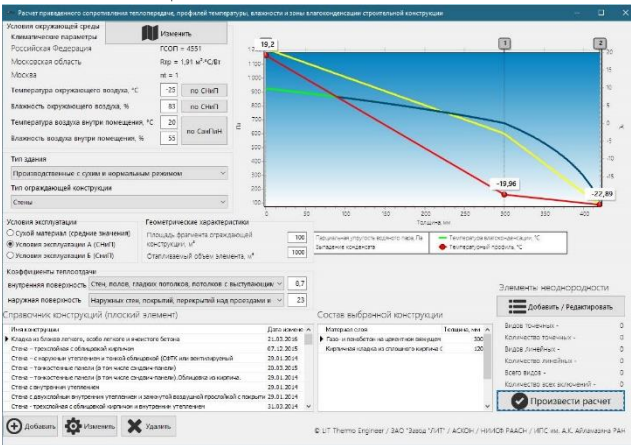


Рис. 1. Интерфейс пользователя. Расчет сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции

Сопротивление теплопередаче вертикального наружного ограждения (наружной стены)  $R_0$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ , определяется [2]:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_g} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (1)$$

где  $\alpha_g$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$ ;  $R_k$  – термическое сопротивление ограждающей конструкции,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$ .

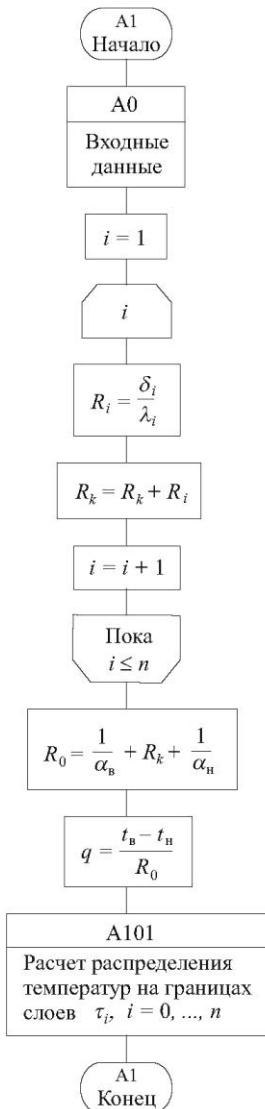


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции

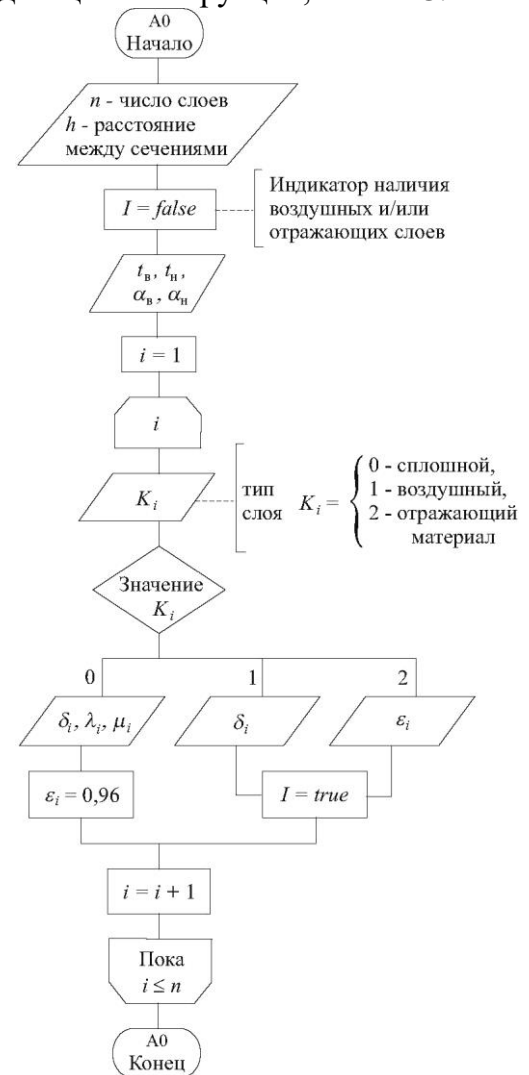
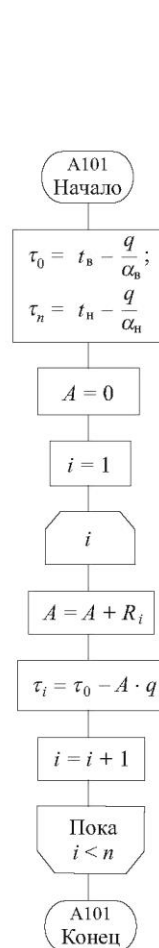


Рис. 3. Блок-схема определения наличия в ограждающей конструкции воздушных прослоек и отражательной изоляции

Термическое сопротивление многослойной ограждающей конструкции  $R_k$ , включающей последовательно расположенные конструкционные, теплоизоляционные, облицовочные слои и воздушные прослойки, равно:

$$R_k = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{в.п.}, \quad (2)$$

где  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя конструкции, м;  $\lambda_i$  – расчетный коэффициент теплопроводности материала  $i$ -го слоя конструкции, Вт/м·°С;  $R_{в.п.}$  – термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, расположенной параллельно слоям многослойной конструкции, м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки  $R_{в.п.}$  в ограждающей конструкции рассчитывается по формуле [2]:

$$R_{в.п.} = \frac{\tau_{1в.п.} - \tau_{2в.п.}}{q}, \quad (3)$$

где  $\tau_{1в.п.}$  – температура на поверхности воздушной прослойки, расположенной ближе к внутренней поверхности ограждающей конструкции, °С;  $\tau_{2в.п.}$  – температура на поверхности воздушной прослойки, расположенной ближе к наружной поверхности ограждающей конструкции, °С;  $q$  – поток теплоты, проходящий через 1 м<sup>2</sup> наружного ограждения с воздушной прослойкой, Вт/м<sup>2</sup>.

Поток теплоты  $q$ , проходящий через воздушную прослойку состоит из трех составляющих:

$$q = q_{изл.} + q_{мен.} + q_{кон.}, \quad (4)$$

где  $q_{изл.}$  – поток теплоты, передаваемый излучением, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{мен.}$  – поток теплоты, передаваемый теплопроводностью, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{кон.}$  – поток теплоты, передаваемый конвекцией, Вт/м<sup>2</sup>.

Температуры по слоям многослойного ограждения и на поверхности воздушной прослойки  $\tau_{1в.п.}$  и  $\tau_{2в.п.}$  вычисляют по формуле:

$$\tau_n = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_0} (R_{в.п.} + \sum_{n-1} R), \quad (5)$$

где  $\tau_n$  – температура на внутренней поверхности  $n$ -ого слоя ограждения (нумерация слоев принимается от внутренней поверхности ограждения), °С;  $\sum_{n-1} R$  – сумма термических сопротивлений  $(n-1)$  слоев ограждения, м<sup>2</sup>·°С/Вт (найденные нами значения приведены в табл. 1);  $R_0$  – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $t_g$  – расчетная температура внутреннего воздуха, °С;  $t_n$  – расчетная температура наружного воздуха, °С.

Таблица 1. Термическое сопротивление замкнутых воздушных прослоек без отражательной теплоизоляции

Толщина воздушной прослойки, м	Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, $R_{в.п.}$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	
	при температуре воздуха в прослойке	
	положительной	отрицательной
0,01	0,13	0,15
0,02	0,14	0,15
0,03	0,14	0,16
0,05	0,14	0,17
0,1	0,15	0,18
0,15	0,15	0,18
0,2 – 0,3	0,15	0,19

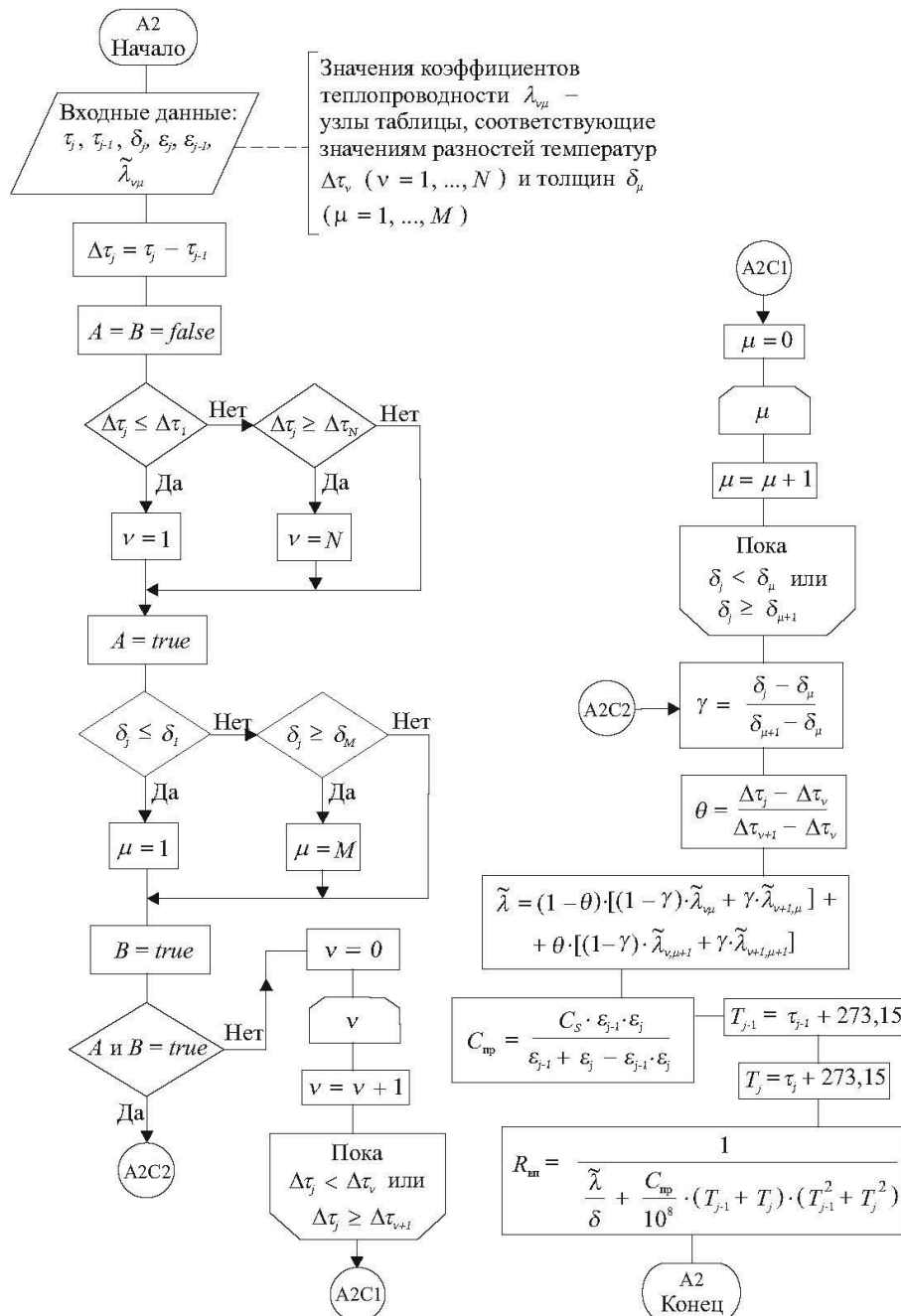


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета сопротивления теплопередаче замкнутой воздушной прослойки с учетом коэффициентов отражения

Поток теплоты, передаваемый через воздушную прослойку за счет излучения, с учетом температур на поверхностях воздушной прослойки и принятых коэффициентов излучения поверхности, определяют по формуле [2]:

$$q_{изл.} = C_{np.} \left[ \left( \frac{\tau_{1в.п.} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\tau_{2в.п.} + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

где  $C_{np.}$  – приведенный коэффициент излучения. Его находят по формуле:

$$C_{np.} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1в.п.}} + \frac{1}{C_{2в.п.}} - \frac{1}{C_0}}, \quad (7)$$

где  $C_{1в.п.}$  и  $C_{2в.п.}$  – коэффициент излучения одной и другой поверхности воздушной прослойки,  $Вт/м^2К^4$ ;  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $[Вт/м^2К^4]$ , равный  $5.67 [Вт/м^2К^4]$ .

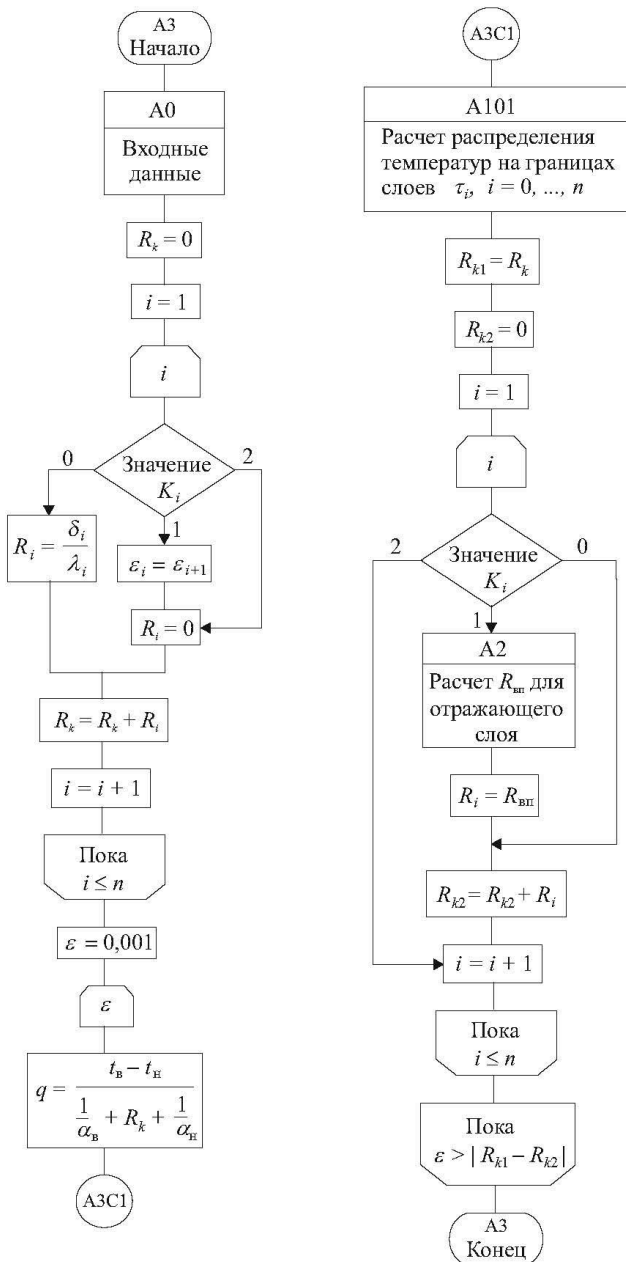


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, содержащей воздушные прослойки и отражательную изоляцию

многослойных конструкций возможна внутренняя конденсация влаги, что может приводить к размножению опасных биологических культур и даже приводить к разрушению ограждения.

В условиях Российской Федерации температура и влажность в помещении обычно выше, чем на улице, поэтому в большинстве случаев влагоперенос направлен в сторону наружной части ограждения. Конденсация влаги внутри ограждения возникает, если температура в определенном сечении ограждения достигла температуры конденсации, которая, в свою очередь, зависит от парциального давления водяного пара.

Приведенные формулы соответствуют случаю, когда площадь ограждения равна площади нагревателя и они расположены параллельно друг другу. С учетом формы, взаимного расположения и площади излучающих поверхностей формула для радиационного теплообмена  $q_{изл.}$  в условии (4) имеет вид (см. [2, 1, 7]):

$$q_{изл.} = \frac{C_s F_1 \varphi_{1-2} \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{Rq + T_-}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{T_n} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{T_c} - 1 \right)}, \quad (8)$$

где  $F_1, F_2$  – площади излучающей и поглощающей поверхности,  $m^2$ ;  $\varphi_{1-2} \leq 1$  коэффициент облученности поглощающей поверхности, в нашем случае он равен единице.

Блок-схемы алгоритмов теплотехнического расчета полнотельных строительных конструкций и ограждений с использованием воздушных прослоек с отражательной изоляцией представлены на рис. 2, 3, 4, 5. Как видно из блок-схем, расчеты конструкций с учетом коэффициентов излучения поверхностей значительно сложнее.

На рис. 6 показан результат расчета конструкции с отражательной теплоизоляцией [8].

Многослойные конструкции могут проявлять различных характер влагопереноса в зависимости от теплопроводности отдельных слоев и их взаимного расположения. В неблагоприятном случае внутри

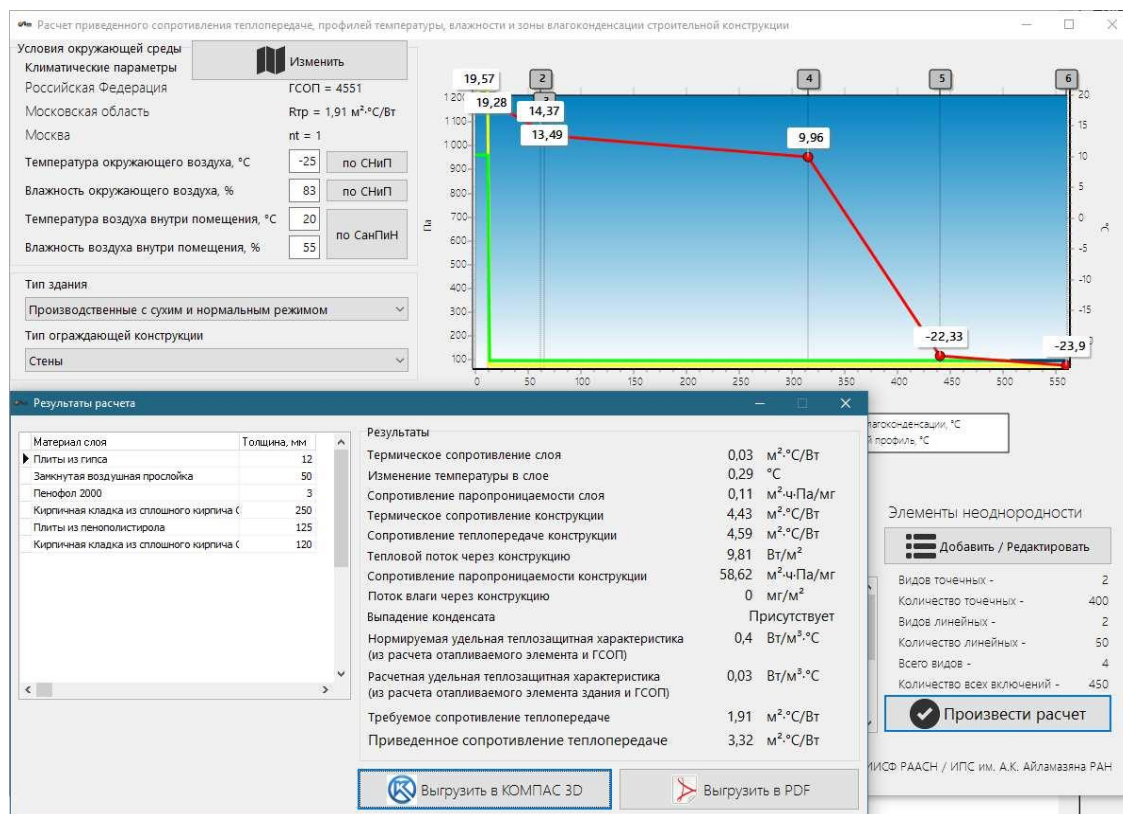


Рис. 6. Интерфейс пользователя. Результаты расчета

Ограждение может включать пленку из материала, не пропускающего пары воды (алюминиевая фольга, полиэтилен). Такой слой практически не создает теплового сопротивления, но приводит к тому что профиль давления паров водяного пара становится ступенчатым. С каждой стороны такой пленки давление паров постоянно и равно давлению на соответствующей границе ограждения. Влагоконденсация внутри ограждения возникает, если высокая концентрация влаги оказывается в сечении с достаточно низкими температурами. Для устранения возможности возникновения этого явления слои с низкой паропроницаемостью должны быть смещены в зону высоких температур и паронепроницаемый слой, расположенный в зоне высоких температур, с повышенным давлением водяного пара предохраняет ограждение от влагоконденсации.

Если ограждение включает воздушную прослойку, то она не представляет сопротивления влагопереносу, но имеет значительное тепловое сопротивление, поэтому влагонепроницаемый слой следует укреплять на “теплой” стороне воздушной прослойки.

**Результаты.** Полученные алгоритмы моделирования теплопереноса, учитывают влагопроводность материалов, позволяют определить сопротивление диффузии водяных паров конструкции, возможные зоны влагоконденсации в ее сечении, реализованы в пакете прикладных программ LIT THERMO ENGINEER (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014617857) [5, 6, 9], который доступен на сайте <http://zavodlit.ru/>.

*Автор выражает искреннюю благодарность за обсуждение результатов работы и постановку задач исследования Цирлину А. М., Умняковой Н. П., Цыганкову В. М.*

#### Библиографический список

1. Ахременков А.А., Кузьмин В.А., Цирлин А.М., Цыганков В.М. Энергетическая эффективность покрытия внутренней поверхности помещений отражательной теплоизоляцией // Строительные материалы. декабрь 2013

2. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: Высшая школа. 1982. 415 с.
3. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат. 1979. 248 с.
4. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. // 3-е изд. М. : АВОК Северо-Запад. 2006. 400 с.
5. Бузало Н.А., Чернышкова И.А. Использование информационных технологий для формирования профессиональных компетенций будущих строителей // Сборник докладов на конференции «Місто. Культура. Цивілізація». Харків. Квітень. 2015.
6. Лебединская А.Р. Современные программные средства для проектирования тепловой защиты здания с учетом требований энергосбережения и энергоэффективности // Перспективы развития строительного комплекса. 2015 №1. С. 49 –54.
7. Умнякова Н.П. Теплопередача через ограждающие конструкции с учетом коэффициентов излучения внутренних поверхностей помещения // Жилищное строительство. 2014. № 6. С. 14-17.
8. Умнякова Н.П., Цыганков В.М., Кузьмин В.А. Экспериментальные теплотехнические исследования для рационального проектирования стеновых конструкций с отражательной теплоизоляцией // Жилищное строительство. 2018. № 1-2. С. 38-42.
9. Цыганков В.М. Современные инструменты для расчета тепловой оболочки здания // Все о ЖКХ. 2015, №1 (25).

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВО ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (ТС) – МАТЕРИАЛЫ (ПРАКТИКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТС)

Ю.К. Машунин

*Дальневосточный Федеральный университет,  
Россия, Владивосток, mashunin@mail.ru*

*Аннотация.* Работа представляет второй раздел исследования и развития статьи «Концепции оптимального проектирования технических систем (ТС)» (математическое моделирование и реализация). В работе представлена ТС как векторная задача математического программирования. Один из критериев ТС представляет характеристику материала, из которого изготовлена деталь этой ТС. Критерии (характеристики) ТС формируются в условиях определенности (известна функциональная зависимость каждой характеристики и ограничений от параметров) и в условиях неопределенности (нет достаточной информации о функциональной зависимости каждой характеристики от параметров). В построенной математической модели технической системы критерии в условиях неопределенности преобразуются в условия определенности. При числовой реализации Конструктор ТС вводит величину критерия, который характеризует материал. Такая величина характеристики является требованием к получению при моделировании структуры материала (Это отражено в третьей статье). Векторная задача – модель ТС - решается на основе нормализации критериев и принципе гарантированного результата при равнозначных критериях и заданном приоритете критерия. Методология исследования, моделирования и системный выбор оптимальных параметров при проектировании технических систем проиллюстрирована на численном примере модели технической системы, в виде векторной задачи нелинейного программирования с четырьмя критериями и заданном приоритете одного из них.

*Ключевые слова:* векторная оптимизация, моделирование технических систем, оптимальное принятие решения при заданном приоритете критерия.

## OPTIMUM PROJECTION IN INTERRELATION THE TECHNICAL SYSTEM (TS)–MATERIALS (PRACTICE. MODEL OPERATION OF THE TS)

Yu. K. Mashunin

*Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok, mashunin@mail.ru*

*Abstract.* Work submits the second section of a research and development of the article "Concepts of Optimum Projection of the Technical Systems (TS)" (mathematical model operation and realization). In paper it is presented the TS as a vector problem of mathematical programming. One of criteria of the TS submits the characteristic of material of which the detail of this of the TS is made. Criteria (characteristics) of the TS are formed in the conditions of a determinacy (the functional dependence of each characteristic and restrictions from parameters is known) and in the conditions of indeterminacy (there is no sufficient information on the functional dependence of each characteristic from parameters). In the constructed mathematical model of technical system criteria in the conditions of indeterminacy will be transformed to determinacy conditions. At numerical realization the Designer of the TS enters the size of criterion which characterizes material. Such size of the characteristic is the requirement to receiving at model operation of structure of material (It is reflected in the third article). The vector problem – model of the TS - is solved on the basis of a normalization of criteria and the principle of the guaranteed result at equivalent criteria and the given priority of criterion. The methodology of a research, model operation and the systemic choice of optimum parameters at projection of technical systems is illustrated on a numerical example of model of technical system, in the form of a vector problem of non-linear programming with four criteria and the given priority of one of them.

*Keywords:* Vector optimization, Modeling of technical systems, Optimum decision-making, at the given priority of criterion.

**1. Введение.** Выбор оптимальных параметров технической системы в зависимости от ее функциональных характеристик является основной задачей системы автоматизированного проектирования (САПР). Одно из направлений проектирования связано с созданием математических моделей технических систем. На базе разработанных моделей мы проводим исследование, моделирование и выбираем оптимальные параметры технических систем. Такое направление исследований

значительно сокращает сроки проектирования и повышает качество создаваемых технических систем. Поэтому проблеме математического моделирования технических систем, как составной части системы автоматизированного проектирования уделяется большое внимание, как в России, так и за рубежом в теоретических и прикладных аспектах [1-15].

Функционирование технического объекта, системы определяется некоторым набором характеристик, функционально зависящих от параметров системы, и улучшение по одной из этих характеристик приводит к ухудшению другой. Возникает проблема определения знаний параметров, которые улучшат функциональные характеристики технической системы одновременно. Эти задачи решаются в настоящее время, как на техническом (экспериментальном), так и на математическом (модельном) уровне. Модель в этом случае может быть сформирована в виде векторной (многокритериальной) задачи математического программирования, векторный критерий которой определяет характеристики технической системы [4, 6, 11, 12]. В работах [10, 11] представлена организация работ в САПР как концепция, которая представляет систему взглядов на проблему автоматизации проектирования. Организация работ по *оптимальному проектированию технической системы* включает ряд крупных этапов.

Первый из них это выбор наилучших параметров (конструкции) технической системы. В настоящее время это наименее формализованный этап. Задачи выбора наилучших параметров ТС и их характеристик решается, как правило, с использованием экспертных оценок, а также «методом проб и ошибок»;

Второй этап включает систему автоматизированного проектирования (САПР). На этом этапе решаются задачи структурного и параметрического синтеза. Нами формируется проектная и сметная документация. В настоящее время этот этап наиболее разработан [2]. Создано программное обеспечение проектирования ТС из различных отраслей экономики [2, 13, 14]. К наиболее распространенным критериям классификации САПР относится отраслевое назначение. Выделяют следующие типы: Автоматизированное проектирование инфраструктуры машиностроения; САПР для электронного оборудования; САПР в сфере строительства и т. п.

Третий, четвертый этап связан с опытной и промышленной эксплуатации.

Для решения векторной задачи используются методы, основанные на нормализации критериев и принципе гарантированного результата [3]. В дальнейшем эти методы мы использовали при моделировании технических систем [4, 6, 12]. Методы мы используем при решении векторных задач при равнозначных критериях [7, 12] и при заданном приоритете критерия [4, 11, 12]. Если известна функциональная зависимость каждой характеристики и ограничений от параметров, то математическую модель технической системы мы формулируем в условиях определенности [5, 8, 12]. Если не известна функциональная зависимость каждой характеристики и ограничений от параметров, то математическую модель технической системы мы формулируем в условиях неопределенности [7, 12]. На решение этих проблем в условиях определенности и неопределенности совокупности направлены работы [11, 12]. В реальной жизни мы должны исследовать все множество возможных параметров технической системы (множество Парето) и выбирать наиболее предпочтительное (оптимальное) решение. На решение этих проблем в совокупности направлена работа.

*Цель работы* состоит в создании методологии построения математической модели технической системы в виде векторной задачи математического программирования. Решения векторной задачи в условиях определенности и

неопределенности в совокупности. Исследования, моделирования и системного выбора оптимальных параметров при проектировании технических систем из всего допустимого множества параметров (множества Парето). При моделировании используем методы решения при равнозначных и с заданным приоритетом критерия.

Для реализации поставленной цели в работе представлено: построение модели технической системы в виде векторной задачи математического программирования; показана методология построения математической модели технической системы условиях определенности и неопределенности в совокупности; реализация принятия решений (т.е. выбор оптимальных параметров технической системы) при равнозначных критериях; реализация принятия решений при заданном приоритете критерия, т.е. выбор любой оптимальной точки из множества Парето; мы разработали программное обеспечение для решения векторных задач с равнозначными критериями и с заданным приоритетом критерия. Методология моделирования проиллюстрирована на численном примере модели технической системы, в виде векторной задачи нелинейного программирования, реализованной в системе *Matlab* [14]. Методология имеет системный характер и может быть использована как для технических, так и экономических задач [11, 12].

Проблема выбора оптимальных параметров технических систем по функциональным характеристикам возникает при изучении, анализе и проектировании технических систем и связана с выпуском продукции высокого качества.

## 2. Математическая модель технической системы

**2.1. Математическая модель технической системы в условиях определенности и неопределенности.** При построении математической модели технической системы (3)-(6) возможны условия определенности и неопределенности, исследование этих вопросов проводилось в работах: [6, 8, 9, 11, 12].

*Условия определенности* характеризуются тем, что известна функциональная зависимость каждой характеристики и ограничений от параметров технической системы [7, 9, 12].

*Условия неопределенности* характеризуются тем, что отсутствует достаточная информация о функциональной зависимости каждой характеристики и ограничений от параметров [6, 7, 12].

В реальной жизни условия определенности и неопределенности совмещаются. Модель технической системы должна отражать эти условия. Представим модель технической системы в условиях определенности и неопределенности [11]:

$$Opt F(X) = \{ \max F_1(X) = \{ \max f_k(X), k = \overline{1, K_1^{def}} \}, \quad (1)$$

$$\max I_1(X) \equiv \{ \max \{ f_k(X_i, i = \overline{1, M}) \}^T, k = \overline{1, K_1^{unc}} \}, \quad (2)$$

$$\min F_2(X) = \{ \min f_k(X), k = \overline{1, K_2^{def}} \}, \quad (3)$$

$$\min I_2(X) \equiv \{ \min \{ f_k(X_i, i = \overline{1, M}) \}^T, k = \overline{1, K_2^{unc}} \}, \quad (4)$$

$$\text{при ограничениях } f_k^{\min} \leq f_k(X) \leq f_k^{\max}, k = \overline{1, K}, x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max}, j = \overline{1, N}, \quad (5)$$

где  $X = \{x_j, j = \overline{1, N}\}$  – вектор управляемых переменных (конструктивных параметров);

$F(X) = \{F_1(X), F_2(X), I_1(X), I_2(X)\}$  – векторный критерий, каждая компонента которого представляет вектор критериев (характеристик) технической системы (1)-(4), которые функционально зависят от дискретных значений вектора переменных  $X$ ;

$F_1(X), F_2(X)$  – множество функций **max** и **min**, соответственно;

$I_1(X)$  и  $I_2(X)$  множество матриц **max** и **min**, соответственно;

$K_1^{def}, K_2^{def}$  (*definiteness*),  $K_1^{unc}, K_2^{unc}$  (*uncertainty*) множество критериев **max** и **min** сформированные в условиях определенности и неопределенности;

в (9)  $f^k \leq f_k(X) \leq \bar{f}^k$ ,  $k=\overline{1, K}$  – вектор-функция ограничений, накладываемых на функционирование технической системы, (функциональные ограничения);

$x^j \leq x_j \leq \bar{x}^j$ ,  $j=\overline{1, N}$  – параметрические ограничения.

**2.2. Численная модель технической системы с равнозначными критериями и с заданным приоритетом критерия.** В работе [11] рассмотрена задача «Численное моделирование технической системы», в которой известны данные о четырех функциональных характеристиках и ограничениях, накладываемых на функционирование технической системы. Одна часть характеристик сформирована в условиях определенности, а для другой части известны дискретные значения характеристик (условия неопределенности). Третья характеристика определяет структуру материала, из которого изготовлено изделие. Опуская промежуточные построения, представим математическую (численную) модель технической системы в виде векторной задачи математического программирования:

$$\text{opt } F(X) = \{ \max F_1(X) \equiv \{ \max f_1(X) \equiv 40.0 + 11.55 * x_1 + 3.55 * x_2 + 1.0 * x_3 + 0.018 * x_1 * x_2 + 0 * x_1 * x_3 - 0 * x_2 * x_3 - 0.0875 * x_1^2 - 0.0875 * x_2^2 + 0 * x_3^2, \quad (6)$$

$$\max f_3(X) \equiv 44.5 - 0.11 * x_1 + 0.184 * x_2 - 0.0438 * x_3 - 0.0003 * x_1 * x_2 - 0.0029 * x_1 * x_3 - 0.0014 * x_2 * x_3 + 0.004 * x_1^2 + 0.0792 * x_2^2, \quad (7)$$

$$\min F_2(X) = \{ \min f_2(X) \equiv -43.1 + 0.7359 * x_1 + 51.3703 * x_2 + 0.3516 * x_3 + 0.0089 * x_1 * x_2 + 0.0649 * x_1 * x_3 + 0.0006 * x_2 * x_3 - 0.0082 * x_1^2 - 0.1818 * x_2^2 + 0.0004 * x_3^2, \quad (8)$$

$$\min f_4(X) \equiv 20.5188 - 0.2967 * x_1 - 0.3384 * x_2 + 0.1433 * x_3 - 0.0061 * x_1 * x_2 + 0.0212 * x_1 * x_3 + 0.0011 * x_2 * x_3 + 0.015 * x_1^2 + 0.0018 * x_2^2 - 0.0023 * x_3^2 \} \quad (9)$$

$$\text{at restrictions } 20 \leq x_1 \leq 80, 20 \leq x_2 \leq 80, 20 \leq x_3 \leq 80. \quad (10)$$

где  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$  – вектор переменных, определяющий параметры технической системы;  $f_3(X), f_4(X)$  – функции, построенные в условиях определенности;  $f_1(X), f_2(X)$  – функции, построенные в условиях неопределенности; (10) – параметрические ограничения технической системы.

Для решения векторной задачи математического программирования (6)-(10) используются методы, основанные на нормализации критериев и принципе гарантированного результата [3,12].

В результате решения ВЗМП (6)-(10) при равнозначных критериях и соответствующей ей  $\lambda$ -задачи (21)-(26) [11] получили:

$X^o = \{X^o, \lambda^o\} = \{X^o = \{x_1=60.36, x_2=64.52, \lambda^o=0.3236\}$  – точку оптимума – конструктивные параметры технической системы;

$f_k(X^o), k=\overline{1, K}$  – величины критериев (характеристик технической системы):

$$\{f_1(X^o)=257.3, f_2(X^o)=2321, f_3(X^o)=292.6, f_4(X^o)=17.6\}; \quad (11)$$

$\lambda_k(X^o), k=\overline{1, K}$  – величины относительных оценок

$$\{\lambda_1(X^o)=0.4459, \lambda_2(X^o)=0.4459, \lambda_3(X^o)=0.4459, \lambda_4(X^o)=0.95\}; \quad (12)$$

$\lambda^o=0.4459$  – это максимальный нижний уровень среди всех относительных оценок, измеренный в относительных единицах:  $\lambda^o = \min(\lambda_1(X^o), \lambda_2(X^o), \lambda_3(X^o), \lambda_4(X^o))$ ,  $\lambda^o$  – также называют гарантированным результатом в относительных единицах, т. е.  $\lambda_k(X^o)$  и соответственно характеристики технической системы  $f_k(X^o)$  нельзя улучшить, не ухудшая при этом другие характеристики.

Результат решения  $\lambda$ -задачи: функции (критерии)  $f_1(X^o), f_2(X^o), f_3(X^o), f_4(X^o)$  в относительных единицах  $\lambda_1(X^o), \lambda_2(X^o), \lambda_3(X^o), \lambda_4(X^o)$  представим в трехмерной системе координат  $x_1, x_2$  и  $\lambda$  на рис. 1.

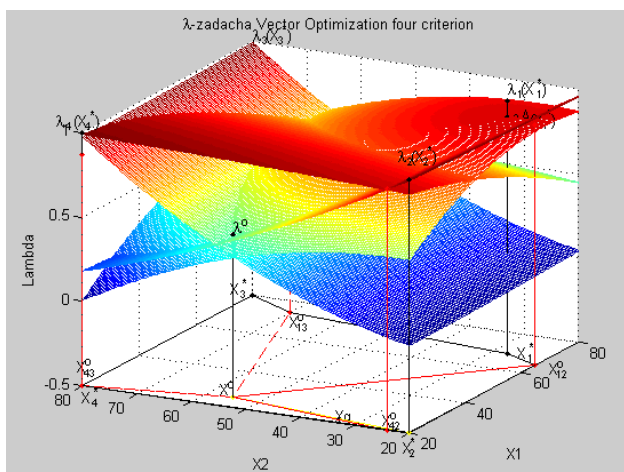


Рис. 1. Решение  $\lambda$ -задачи в трехмерной системе координат  $x_1, x_2$  и  $\lambda$

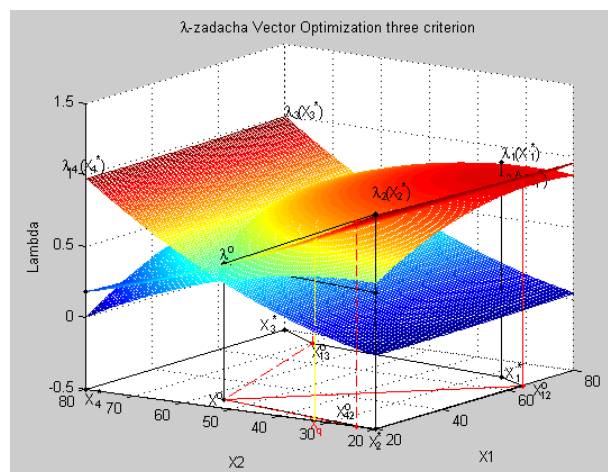


Рис. 2. Решение  $\lambda$ -задачи: 1, 2, 3 критерий в координатах  $x_1, x_2$  и  $\lambda$ .

Заметим, что в соответствии с теоремой 1 [3,12], в точке  $X^0$  критерии 1, 2, 3 противоречивы. Это противоречие определяется равенством:

$$\lambda_1(X^0) = \lambda_2(X^0) = \lambda_3(X^0) = \lambda^0 = 0.4459, \quad (13)$$

а остальные критерии неравенством  $\{\lambda_4(X^0) = 0.95\} > \lambda^0$ . Эти три критерия в относительных единицах:  $\lambda_1(X^0), \lambda_2(X^0), \lambda_3(X^0)$  представлены в трехмерной системе координат  $x_1, x_2$  и  $\lambda$  на рис. 2. Критерии  $\lambda_1(X^0), \lambda_2(X^0), \lambda_3(X^0)$  являются основой исследования работы «Оптимальное проектирование во взаимосвязи Техническая система – Материалы». Как правило, из пары противоречивых критериев (13) выбирается критерий, который лицо, принимающее решение, (ЛПР) хотело бы улучшить. Такой критерий называется «приоритетным критерием», обозначим его  $q=2 \in K$ . Процедуры выбора смотри [1]. Критерий исследуется во взаимодействии с первым критерием  $k=1 \in K$ . На дисплей выдается сообщение «Данные о критерии  $q=2$ »:

$$f_q(X^0) = 2320.95 \leq f_q(X) \leq 959.97 = f_q(X^*), \quad q=2 \in K. \quad (14)$$

В относительных единицах критерий  $q=2$  изменяется в следующих пределах:

$$\lambda_q(X^0) = 0.4459 \leq \lambda_q(X) \leq 1 = \lambda_q(X^*), \quad q=2 \in K. \quad (15)$$

Конструктивные данные (14), (15) анализируются ЛПР (Конструктором Технической системы). Он принимает решение и на сообщение «Введите величину приоритетного критерия  $f_q$ » вводит  $f_q = 1500$ .

Компьютер решает векторную задачу с приоритетом критерия (Процедуры выбора смотри [1]) и выдает ответ:

$$X^q = \{x_1 = 22.38, x_2 = 34.05, x_3 = 24.09\}. \quad (16)$$

Полученная точка оптимума  $X^q$  представлена в трехмерной системе координат  $x_1, x_2$  и  $\lambda$  на рис. 1 и 2. Для полученной точки  $X^q$ , вычислим:

$$f(X^q) = \{f_1(X^q) = 311.1, f_2(X^q) = 1558.3, f_3(X^q) = 138.2, f_4(X^q) = 21.7\}; \quad (17)$$

$$\text{относительные оценки критериев } \lambda(X^q) = \{\lambda_k^q, k = \overline{1, K}\}, \lambda_k(X^q) = \frac{f_k(x^q) - f_k^o}{f_k^* - f_k^o}, k = \overline{1, K},$$

$$\lambda(X^q) = \{\lambda_1(X^q) = 0.5425, \lambda_2(X^q) = 0.7564, \lambda_3(X^q) = 0.1413, \lambda_4(X^q) = 0.9301\}; \quad (18)$$

Анализ результатов показывает, что ошибка выбора параметров по второй характеристики (критерию) технической системы составляет:

$$\Delta f_q = |f_q(X^q) - f_q| = |1558.3 - 1500| = 58.3 \text{ или } \Delta f_q \% = 3.8\%. \quad (19)$$

Будем считать, что выбранные параметры  $X^q$ , характеристики в натуральных  $f(X^q)$  и относительных  $\lambda(X^q)$  единицах удовлетворяют требованиям лица,

принимающего решения, (конструктора). Тогда переходим к выбору материала, из которого изготовлена техническая система. Третий критерий  $f_3(X^q)$  определяет по условию задачи важную характеристику материала. **В полученном решении  $f_3(X^q)=138.2$ .** Такую величину характеристики желательно получить при выборе оптимальной структуре материала. На это направлена следующая статья.

**Заключение.** Проблема принятия оптимального решения в сложной технической системе по некоторому набору функциональных характеристик является одной из важнейших задач системного анализа и проектирования. В работе представлена новая технология (методология) построения математической модели технической системы в условиях определенности и неопределенности в виде векторной задачи математического программирования. При построении характеристик в условиях неопределенности использованы регрессионные методы преобразования информации. Разработанные принципы оптимальности и методы дают возможность решать векторные задачи, во-первых, при равнозначных критериях, во-вторых, при заданном приоритете критерия. Методы могут использоваться при проектировании технических систем различных отраслей: электротехнической, авиационно-космической, металлургической и т.п.

#### Библиографический список

1. Машунин Ю. К. Оптимальное проектирование во взаимосвязи Техническая система – Материалы (Теория).
2. Верма Г., Вебер М. AutoCAD Electrical 2016 Подключаем 3D. СПб.: ДМК-Пресс 2016. 384 с.
3. Машунин Ю.К. Методы и модели векторной оптимизации. М.: Наука. 1986. 141 с.
4. Машунин Ю.К., Левицкий В. Л. Методы векторной оптимизации в анализе и синтезе технических систем. Владивосток: ДВГАЭУ. 1996. 131 с.
5. Машунин Ю.К. Решение композиционных и декомпозиционных задач синтеза сложных технических систем методами векторной оптимизации // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. №3. С. 88-93.
6. Машунин Ю.К., Машунин К.Ю. Моделирование технических систем в условиях неопределенности и принятие оптимального решения // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. №4. С. 19-35.
7. Yu. K. Mashunin, K. Yu. Mashunin. Simulation and Optimal Decision Making the Design of Technical Systems // American Journal of Modeling and Optimization. 2015. Vol. 3. No 3. 56-67.
8. Yu. K. Mashunin, K. Yu. Mashunin. Simulation and Optimal Decision Making the Design of Technical Systems (2. The Decision with a Criterion Priority) // American Journal of Modeling and Optimization. 2016. Vol. 4. No 2. 51-66.
9. Yu. K. Mashunin. Vector optimization in the system optimal Decision Making the Design in economic and technical systems // International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science. 2017. Vol. 7. No 1. 42-57
10. Yu. K. Mashunin. Concept of Technical Systems Optimum Designing (Mathematical and Organizational Statement)// International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2017 Proceedings 8076394. Saint Petersburg. Russia/ WOS: 000414282400287 ISBN:978-1-5090-5648-4
11. Yu. K. Mashunin. Optimum Designing of the Technical Systems Concept (Numerical Realization) // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM 2017 Proceedings 8076395. Saint Petersburg. Russia/ WOS: 000414282400288 ISBN:978-1-5090-5648-4
12. Машунин Ю.К., Машунин К.Ю. Векторная оптимизация с равнозначными и приоритетными критериями //Изв. РАН. ТиСУ. 2017. №6. С. 80-99.
13. Торгашов А.Ю., Кривошеев В.П., Машунин Ю.К. и др. Расчет и многокритериальная оптимизация статических режимов массообменных процессов на примере абсорбции в производстве газоразделения //Изв. вузов. Нефть и газ. 2001. № 3. С. 82–86.
14. Кетков Ю. Л., Кетков А.Ю., Шульц М. М. МАТЛАБ 6.x.: программирование численных методов. – СПб.: БХВ-Петербург. 2004. 672 с.
15. Keeney, R. L. and Raiffa, H. Decisions with Multiple Objectives–Preferences and Value Tradeoffs (Wiley. New York. 1976; Radio i svyaz'. Moscow. 1981).

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАССЫ ЛИДАРА

**С.Л. Лещенко \***, **Д.В. Попов \*\***, **Д.О. Непомнящий \*\*\***

*\*Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, lsl24@mail.ru*

*\*\*Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, juuuis92@gmail.com*

*\*\*\*Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, Vebs\_mail@mail.ru*

*Аннотация.* Изложены результаты поиска эффективного метода дистанционного лидарного зондирования для локализации нефтегазовых месторождений. На основе результатов предварительных исследований построена адекватная модель трассы лидара. Обоснована модификация модели с учетом специфики задач поиска предельных концентраций природных газов в приземном слое. Выполнена модификация модели и моделирование в пакете прикладных программ Matlab. Получены результаты, позволяющие сформировать перечень основных требований к программно-аппаратному обеспечению системы дистанционного зондирования.

*Ключевые слова:* лидар, дистанционное зондирование, математическая модель, нефтяные и газовые месторождения.

## MATHEMATICAL MODEL OF LIDAR ROUTE

**S.L. Leshchenko \***, **D.V. Popov \*\***, **D.O. Nepomnyashchiy \*\*\***

*\*Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, lsl24@mail.ru*

*\*\*Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, juuuis92@gmail.com*

*\*\*\*Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, Vebs\_mail@mail.ru*

*Abstract:* described the results of the search for an effective method for remote lidar sensing for localization of oil and gas fields. Based on the results of preliminary studies revealed an adequate model of the alignment of the lidar. Justified modification of the model taking into account the specifics of the search task limit concentrations of natural gases in the surface layer. Executed modification of models and modeling in the software package Matlab. The received results allow to make a list of basic requirements for software and hardware system distation sounding.

*Keywords:* lidar, remote sensing, mathematical model, methane, oil and gas fields.

Результаты предварительных исследований показали, что при поиске нефтегазовых месторождений одним из эффективных методов разведки является метод дистанционного, лидарного зондирования [1-2]. Сущность метода заключается в следующем: для обнаружения перспективного района проводят дистанционное зондирование с помощью лидара, установленного на подвижном летальном аппарате.

Для ослабления паразитной, солнечной засветки, используются гелий-неоновые лазеры. При этом для повышения избирательности принцип действия лазера основан на методе дифференциального поглощения. По одной трассе лидара посылаются чередующиеся импульсы лазерного излучения, имеющие близкие по значению длины волн. Из-за близости длин волн, посылаемых импульсов коэффициенты рассеивания на молекулах атмосферных газов и аэрозолях, а также коэффициенты отражения для них одинаковы и, таким образом, сравнение двух сигналов после регистрации собранного приемным объектом излучения дает меру интегрального содержания метана вдоль оптического пути.

На основе полученной информации формируется перечень обнаруженных концентраций углеводородов в приземном слое с привязкой к местности, указывающий на наиболее вероятное месторождение нефти и газа. Это позволяет повысить точность разведки и снизить стоимость поисковых работ.

Однако, для эффективного обнаружения предельно малых концентраций углеводородов в приземном слое необходимы высокоточные методы приема, оцифровки и компьютерной обработки, принимаемых лидаром сигналов.

На основе результатов предварительного лабораторного тестирования макетов аппаратуры лидара и с учетом специфики предметной области исследований определено уравнение трассы лидара [3].

Для поиска малых концентраций взвешенных в воздухе частиц лидарное уравнение имеет общий вид:

$$P_{\lambda}(R) = C * \frac{\beta_{\lambda}(R)}{R^2} * e^{-2 \int_0^R \alpha_{\lambda}(x) dx}, \quad (1)$$

где

$R$  – расстояние до рассеивающего объема (м);

$C$  – калибровочная константа (Вт·м<sup>3</sup>);

$P_{\lambda}(R)$  – мощность рассеянного излучения (Вт);

$\beta_{\lambda}(R)$  – объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферы;

$\alpha_{\lambda}(x)$  – объемный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы.

На основании анализа результатов исследований трасс лидара [4], можно сделать обоснованное предположение о необходимости модификации калибровочных констант в выражении (1).

При выполнении замеров на объекте, скорость и высота лёта которого являются динамическими параметрами, важно учитывать площадь телескопа (приемной антенны) и КПД приемника лазерного сигнала.

При значительной высоте лета и наличия препятствий на трассе лидара (трава, лесной покров и пр.) помимо коэффициентов обратного рассеивания и ослабления важно учитывать длительность лазерного импульса и мощность лазера.

Таким образом, полученная калибровочная константа приняла вид:

$$C = P_0 * \eta * c * \tau * A(R), \quad (2)$$

где

$C$  – значение калибровочной константы (Вт·м<sup>3</sup>);

$c$  – скорость света (м/с);

$\tau$  – длительность лазерного импульса (с);

$P_0$  – мощность лазера (Вт);

$\eta$  – числовое значение КПД приемника (калибровочная константа);

$A(R)$  – эффективная площадь приемника (м<sup>2</sup>).

На основании вышеизложенных выражений (1) и (2) можно вывести уравнение следующего вида:

$$P_{\lambda}(R) = P_0 * \eta * c * \tau * A(R) * \frac{\beta_{\lambda}(R)}{R^2} * e^{-2 \int_0^R \alpha_{\lambda}(x) dx}, \quad (3)$$

С целью проверки полученных решений выполнено моделирование трассы лидара. При разработке компьютерной модели учитывались высота и скорость полёта. Согласно предварительным исследованиям самолёты-лаборатории, в том числе и беспилотные, предназначенные для измерения оптических и метеорологических параметров атмосферы и зондирования подстилающей поверхности, имеют среднюю скорость полёта 450 км/ч, с высотой полёта от 30 до 70 метров [5]. При моделировании высота лёта изменялась в этих диапазонах.

Прототипом для моделирования трассы лидара выбран гелий-неоновый лазер с заданными длинами волн  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм и  $\lambda_2 = 3,3912$  мкм. На этих длинах волн осуществляется избирательный поиск метана, при котором  $\lambda_1$  на порядок сильнее, нежели  $\lambda_2$  и поглощается метаном.

Моделирование показало, что в летных условиях самолёт-лаборатория будет преодолевать расстояние между замерами за 3 мс. Это обусловливается наличием отраженного пятна засветки на земле диаметром 0,3 м. Определено, что для

исключения рассогласования, приёмник лидара должен принять не менее 10 импульсов. Таким образом, период модуляции лазера составил 300 мкс, что соответствует частоте 3400 герц. На основании полученных результатов определен период лазерного импульса – 300 мкс.

С учетом длительности лазерного импульса в 150 микросекунд, результаты моделирования показали, что для дистанционного зондирования предложенным способом требуются два гелий-неоновых лазера (опорный и измерительный) мощности 20 и 10 мВт, соответственно.

На основании результатов анализа коэффициентов эффективности приёмников, используемых в аналогичной аппаратуре дистанционном зондировании атмосферы, коэффициент принят равным 0,8. При этом объёмный коэффициент обратного рассеяния атмосферы  $\beta(R)$ , согласно табличным данным [6] равен  $6,83 \cdot 10^{-6}$  для длин волн лазеров, используемых в модели.

Результаты моделирования позволили выполнить расчет эффективной площади приемника в соответствии с выражением (4) [6]:

$$A(R) = A_0 * \xi(R), \quad (4)$$

где  $A_0$  – площадь входной апертуры телескопа;  $\xi(R)$  – функция геометрического фактора (ФГФ) лидара, которая учитывает степень перехвата отраженного от мишени лазерного пучка.

Функция геометрического фактора, согласно [7], взята равной единице, площадь входной апертуры телескопа, и определена как выражение 5):

$$A_0 = \pi * D^2 / 4, \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр телескопа, для монтажа на фюзеляже летательного аппарата. Параметр взят равным 150 мм согласно требованиям летных испытаний для выбранного аппарата.

Объёмный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы  $\alpha$  для случая со вторым лазером берется равным 0, так как сигнал второго лазера не поглощается метаном.

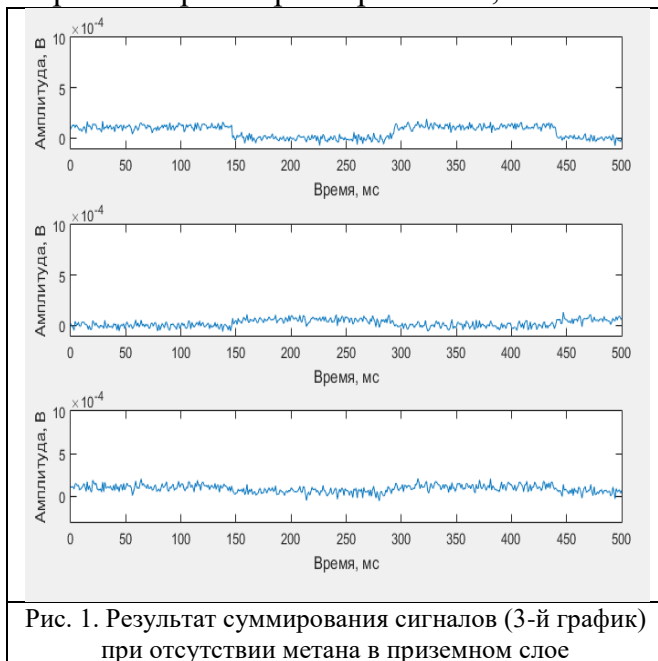


Рис. 1. Результат суммирования сигналов (3-й график) при отсутствии метана в приземном слое

импульсов с первого лазера (рис. 1).

Ниже представлены рисунки, иллюстрирующие работу лидара при поиске утечек метана. Верхний график показывает принятый сигнал от первого лазера, длина волны которого  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм. 2-й график – сигнал со второго лазера с длиной волны  $\lambda_2 = 3,3912$  мкм. Для указанных выше исходных данных выбраны наиболее критичные случаи (сигнал полностью поглощен метаном и наоборот, отсутствие утечек углеводородов). При малом содержании метана сигнал с фотоприемника будет представлять последовательность чередующихся импульсов, аналогичную последовательности посылаемых

При высоком содержании метана, сигнал с фотоприёмника представляет последовательность чередующихся импульсов, находящихся в противофазе посылаемым импульсам с первого лазера (рис. 2).

Таким образом, на основе проведённого моделирования трассы лидара, можно утверждать, что предложенная математическая модель в совокупности с методом дифференциального поглощения позволяет обрабатывать отражённый от поверхности сигнал с учётом поглощения, исследуемого в работе газом.

Исходя из этого, появляется возможность разработать перечень требований к аппаратуре для обнаружения низших октанов, такие как высота и скорость полёта,

характеристики фотоприёмного элемента (чувствительность, КПД и т.д.), а также климатические ограничения при работе разрабатываемого комплекса.

Исходными данными для составления перечня требований к аппаратуре являются:

- гелий-неоновый лазер с заданными длинами волн  $\lambda_1 = 3,3922$  мкм и  $\lambda_2 = 3,3912$  мкм;
- объёмный коэффициент обратного рассеяния атмосферы  $\beta(R)$  составляет  $6,83 \cdot 10^{-6}$  для указанных выше длин волн;
- КПД фотоприёмника не менее 0,8.

#### Библиографический список

1. Попов Д.В., Хабаров В.А. Авиационное зондирование атмосферы с целью разведки месторождений природного газа – как перспективный метод автоматизированного поиска газовых месторождений в приземном слое // Сборник статей международной научно-практической конференции: «Технические науки – от теории к практике». Новосибирск: СибАК. 2015. С. 59-64.
2. Модель лидара для бортовой системы зондирования углеводородов малого космического аппарата / Д.В. Попов, В.А. Хабаров, Е.А. Вейсов, С.Н. Титовский / Сборник статей международной научной конференции «региональные проблемы дистанционного зондирования земли». Красноярск: СФУ. 2014. С.305-313.
3. Математическая модель дистанционного зондирования атмосферы для определения малых концентраций углеводородов / Д.В. Попов, Е.А. Вейсов, А.В. Парунов, И.Н. Сушкин // Научно-технические технологии. Москва: Радиотехника. 2016. С. 48-51.
4. Самолет лаборатория «Оптик» [электронный ресурс]: Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН // 2016. URL: <http://www.iao.ru/ru/resources/equip/plane> (дата обращения: 19.09.2017).
5. Кендела Д. Прикладная инфракрасная спектрометрия: науч. Издание. Москва: Мир, 1970. 376 с.
6. Приборы и системы управления / В. Р. Козубовский, Н. М. Эрдеви, А. А. Булыга, Ю.Ю. Попадинец // Приборы и техника эксперимента. 1983. № 12. С. 24.

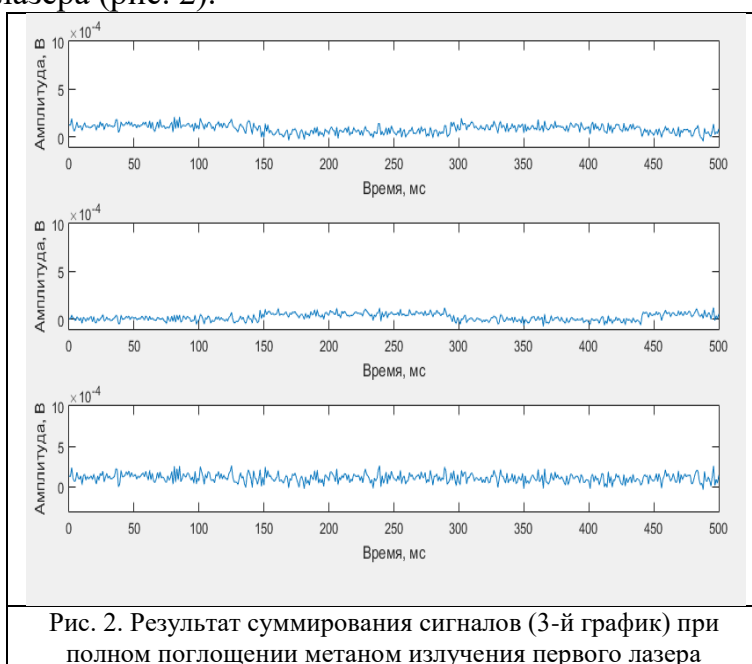


Рис. 2. Результат суммирования сигналов (3-й график) при полном поглощении метаном излучения первого лазера

УДК 004.932

## **РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ СЕКЦИЙ СВЕТОФОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦВЕТОВЫХ ПЯТЕН НА ИЗОБРАЖЕНИИ<sup>1</sup>**

**Д.А. Ковалёв, Д.А. Юдин**

*Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,  
Россия, Белгород, ydin.da@bstu.ru*

*Аннотация.* Рассмотрен разработанный алгоритм распознавания сигналов секций светофора на изображениях, полученных с бортовой камеры, установленной на автомобиле. Предлагаемый алгоритм основан на анализе цветowych пятен с применением цветовой модели HSV (Hue, Saturation, Value). Он позволяет по отдельности распознать сигналы секций светофора, выделять области нахождения сигналов. Программная реализация алгоритма протестирована на наборе данных, состоящих из 1790 фотографий светофоров и показала приемлемые показатели точности и полноты распознавания сигналов красных и зеленых секций светофора. Разработанный алгоритм может использоваться в программном обеспечении бортовой системы технического зрения транспортного средства.

*Ключевые слова:* распознавание изображений, светофор, сигнал, классификация, программное обеспечение.

## **RECOGNITION OF TRAFFIC LIGHT SECTIONS SIGNALS USING THE ANALYSIS OF COLOR SPOTS ON THE IMAGE**

**D.A. Kovalev, D.A. Yudin**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Russia, Belgorod, ydin.da@bstu.ru*

*Abstract.* The article describes the developed algorithm for traffic light sections signals recognition on images obtained from an on-board camera installed on a car. The proposed algorithm is based on the analysis of color spots using HSV (Hue, Saturation, Value) color model. It provides recognition of traffic light sections signals, allocation of signal areas. Software implementation of developed algorithm was tested on a dataset consisting of 1790 traffic lights photos. The developed algorithm can be used in the software of on-board vehicle vision system.

*Keywords:* image recognition, traffic lights, signal, classification, software.

Автоматизация процесса управления автомобилем – сложная задача, которую можно решить, разбив её на более простые подзадачи. Одна из таких подзадач – распознавание светофоров на изображениях, получаемых с бортовой камеры технического зрения. Эта подзадача обычно решается в два этапа: детектирование области расположения светофора и классификация этой области для определения сигнала светофора, запрещающего или разрешающего движение.

На первом этапе распознавания может применяться метод Виолы Джонса [1], в основе которого содержится каскадный классификатор, который работает с полутоновыми изображениями, однако для малых объектов, какими является светофор он дает много ложных срабатываний. Детекторы объектов на основе глубоких свёрточных нейронных сетей [2] являются более точными, но более ресурсоемкими.

В настоящей работе рассматривается второй этап распознавания светофора – классификация найденной области изображения.

Для этого может использоваться метод, изложенный в [3], который основан на следующем принципе: если светофор активен, то цвет области, содержащей сигнал

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-3130.2017.9 (договор №14.Z56.17.3130-МК).

светофора, в цветовом пространстве RGB (Red, Green, Blue) [4] будет очень сильно отличаться от остальных цветов, окружающих её. Согласно описанному принципу красные, жёлтые и зелёные пиксели могут быть распознаны путём исключения двух других цветовых компонент. Другой существующий подход основан на бинаризации изображения и нахождения замкнутых контуров светящихся секций светофора [5], его реализация осуществлена с помощью библиотеки OpenCV [6]. Такое решение приводит к ошибкам в случае размытых контуров секций светофора и наличии помех или шумов на исходном изображении. В работе [7] классификация сигналов светофора осуществляется с помощью нейронной сети. При этом происходит определение класса каждого пикселя изображения с помощью классификатора, основанного на модифицированном Гауссовом распределении [8], то есть ищутся сегменты изображения, содержащие ту или иную светящуюся секцию светофора. Однако такой подход на основе нейронных сетей требует для корректной настройки весов большой обучающей выборки при различных условиях освещения и типов светофоров.

В настоящей статье рассматривается разработка алгоритма распознавания сигналов секций светофора. Исследуемый тип светофоров ограничен вертикальными светофорами с тремя секциями, которые являются наиболее распространенными на дорогах России. Распознавание сигналов секций светофора по отдельности позволяет выявить как информативный сигнал светофора, так и возможные нарушения его работы. Для проверки работоспособности алгоритма подготовлена выборка из 1790 изображений, которые отсортированы по четырем категориям: светофоры с активной красной секцией (рис. 1 а), светофоры с активной желтой секцией (рис. 1 б), светофоры с активной зеленой секцией (рис. 1 в), неактивные светофоры (рис. 1 г). Решение задачи распознавания этих четырех категорий сводится к задаче классификации изображений светофоров.

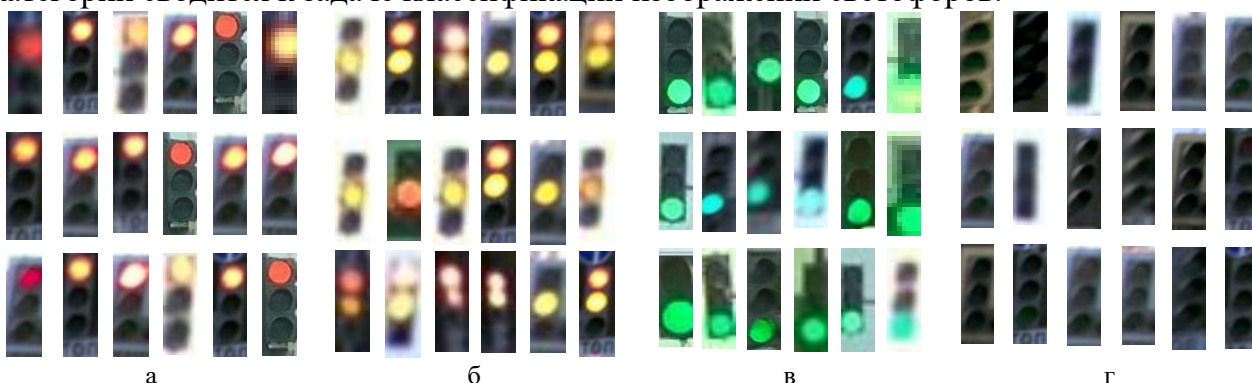


Рис. 1. Фрагмент набора изображений для тестирования алгоритма распознавания сигналов секций светофора

Предлагаемый алгоритм распознавания сигналов секций светофора основан на анализе цветowych пятен на изображении и содержит 7 основных шагов.

1. Выбранное изображение светофора конвертируется из цветовой модели RGB в цветовую модель HSV (Hue, Saturation, Value) [9].

2. Задаются диапазоны цветов в модели HSV, в которых будет осуществляться поиск цветowych пятен сигналов секций светофоров. Красный, желтый и зеленый цвета сигналов задаются следующими диапазонами значений канала  $H$ :

$$\begin{aligned} H_R &\in [0, H_{R\max}] \cup [H_{R\min}, 255], \\ H_Y &\in [H_{Y\min}, H_{Y\max}], \\ H_G &\in [H_{G\min}, H_{G\max}], \end{aligned}$$

где  $H_R$  – диапазон, соответствующий красному цвету, экспериментально подобраны его пороговые значения  $H_{R\max} = 13$ ,  $H_{R\min} = 157$ ,  $H_Y$  – диапазон, соответствующий желтому цвету, экспериментально подобраны его пороговые значения  $H_{Y\max} = 33$ ,  $H_{Y\min} = 8$ ,  $H_G$  – диапазон, соответствующий зеленому цвету, экспериментально

подобраны его пороговые значения  $H_{G\max} = 95$ ,  $H_{G\min} = 59$ . Диапазоны значений каналов  $S$  и  $V$  задаются одинаковыми для всех искомым цветов и экспериментально определены как  $S \in [40, 255]$  и  $V \in [40, 255]$ .

3. Изображение преобразуется из цветного в чёрно-белое, на котором белыми становятся пиксели, цвет которых попал в выбранный диапазон цвета, а всё остальное закрашивается чёрными пикселями. Данная операция продлевается три раза для преобразования изображения в каждом из выбранных цветовых диапазонов для, соответственно, красного, жёлтого и зелёного сигналов. В итоге получается три чёрно-белых изображения (см. рис. 2) с пятнами белого цвета, которые, могут быть сигналами светофора или же посторонними помехами.

4. Для каждого из трех изображений выполняется поиск и разметка отдельных белых пятен на изображениях с помощью двухпроходного алгоритма обнаружения объектов, описанного в [9].

5. Осуществляется выбор белого пятна, имеющего наибольшую площадь на каждом чёрно-белом изображении. Предполагается, что данное пятно является сигналом светофора.

6. Вычисляется центр пятна наибольшей площади для  $j$ -го изображения относительно левого нижнего угла изображения по формуле:

$$C_{xj} = \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij} / n_j, \quad C_{yj} = \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} / n_j,$$

где  $C_{xj}$ ,  $C_{yj}$  – соответственно координаты  $x$  и  $y$  центра пятна наибольшей площади для  $j$ -го черно-белого изображения;  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  – координаты точек пятна на  $j$ -м изображении относительно его левого нижнего угла;  $n_j$  – количество пикселей, относящихся к пятну наибольшей площади для  $j$ -го изображения ( $j = 1 \dots 3$ ).



Рис. 2. Изображение светофора и изображения с предполагаемыми сигналами

7. Сигналы секций светофора определяются на основе анализа трех полученных чёрно-белых изображений с помощью следующих формул:

$$s_{red} = \begin{cases} 1, \text{если } C_{y1} > \frac{h}{2}, \frac{S}{16} < S_{n1} < \frac{S}{2}, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases} \quad s_{yellow} = \begin{cases} 1, \text{если } \frac{h}{3} < C_{y2} < \frac{2h}{3}, \frac{S}{16} < S_{n2} < \frac{S}{2}, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

$$s_{green} = \begin{cases} 1, \text{если } C_{y3} < \frac{h}{3}, S_{n3} > \frac{S}{16}, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases} \quad s_{na} = \begin{cases} 1, \text{если } \overline{s_{red} \vee s_{yellow} \vee s_{green}}, \\ 0, \text{если иначе.} \end{cases}$$

где  $s_{red}$  – сигнал красной секции светофора, он равен единице, если секция активна,  $s_{yellow}$  – сигнал желтой секции светофора,  $s_{green}$  – сигнал зеленой секции светофора,  $s_{na}$  – признак отсутствия сигналов всех секций светофора, равен единице если светофор не работает,  $h$  – высота изображения светофора,  $S$  – количество пикселей изображения светофора,  $S_{nj}$  – количество пикселей наибольшего по площади пятна  $j$ -го изображения светофора.

Алгоритм позволяет выявлять одновременную активность нескольких секций светофоров и определять их сигналы для участников дорожного движения, в том числе выявлять неисправности в работе светофора. Например, о неисправности работы светофора можно судить по тому, является ли истинным выражение  $r_{wrong}$ :

$$r_{wrong} = S_{red} \wedge S_{green} \vee S_{yellow} \wedge S_{green}$$

Сигнал, запрещающий движение определяется выражением  $r_{stop} = S_{red}$ .

Сигнал, разрешающий движение определяется выражением  $r_{start} = S_{green}$ .

Сигнал подготовки к началу движения или предупреждения водителя определяется выражением  $r_{warning} = S_{red} \vee S_{yellow} \wedge S_{red}$ .

В ходе реализации предложенного алгоритма разработано программное обеспечение, которое способно осуществлять распознавание сигналов светофора для единичного изображения и классифицировать большое количество различных изображений светофора. Программное средство является достаточно гибким в использовании благодаря возможности настройки параметров распознавания.

При распознавании единичного изображения светофора выполняется отображение в графический интерфейс зон, в которых находится определенный сигнал светофора.

При распознавании четырех категорий изображений светофоров осуществляется оценка его качества. В окне интерфейса выводится информация о точности ( $P$ ) и полноте ( $R$ ) распознавания, определяемых следующим образом:

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \cdot 100\%, \quad R = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Полнота  $R$  свидетельствует о наличии ошибок второго рода – пропусков, в то время как  $P$  – о ложных срабатываниях. В формулах (1)  $TP$  – истинно-положительные,  $FP$  – ложно-положительные,  $FN$  – ложно-отрицательные результаты распознавания (классификации) сигнала секции светофора.

Также строятся графики кривых ошибок (ROC-кривые – Receiver Operating Characteristic) [10] (см. рис. 3). Показатели качества распознавания набора изображений светофора сохраняются в файле.

Из построенных графиков ROC-кривых видно, что полученные результаты при тестовых испытаниях очень близки к действительным данным. Численной характеристикой ROC-кривой является площадь под кривой (AUC – Area Under Curve) [10]. Все показатели AUC превышают значения 0,9, что свидетельствует о приемлемом качестве классификации.

Программная реализация алгоритма осуществлена на языке Python 3.5 с использованием библиотеки PyQt5. Интерфейс пользователя программы показан на рис. 3, он позволяет распознавать сигналы секций светофора как на единичном изображении, так и на наборе изображений. Также имеется возможность изменять параметры поиска цветовых пятен, а именно диапазоны цветов, в которых будет выполняться поиск сигналов светофора.

В табл. 1 приведены результаты оценки качества распознавания сигналов секций светофора на имеющейся выборке с помощью реализованного алгоритма.

Таблица 1. Оценка качества распознавания сигналов секций светофора на имеющейся выборке изображений

Показатель качества распознавания	Сигнал красной секции	Сигнал желтой секции	Сигнал зеленой секции	Неактивный светофор
Точность (P), %	99,5	77,4	98,2	84
Полнота (R), %	96,7	78,5	99,7	92
Площадь под кривой ошибок (AUC), усл. ед.	0,98	0,93	0,99	0,96

Точность и полнота распознавания сигналов красной и зеленой секций находятся на приемлемом уровне – выше 96,5%, в то время как сигнал желтой секции имеет точность распознавания всего 77,4%, это вызвано сходством диапазона цветов желтого и красного сигналов для различных типов светофоров и условий освещения.

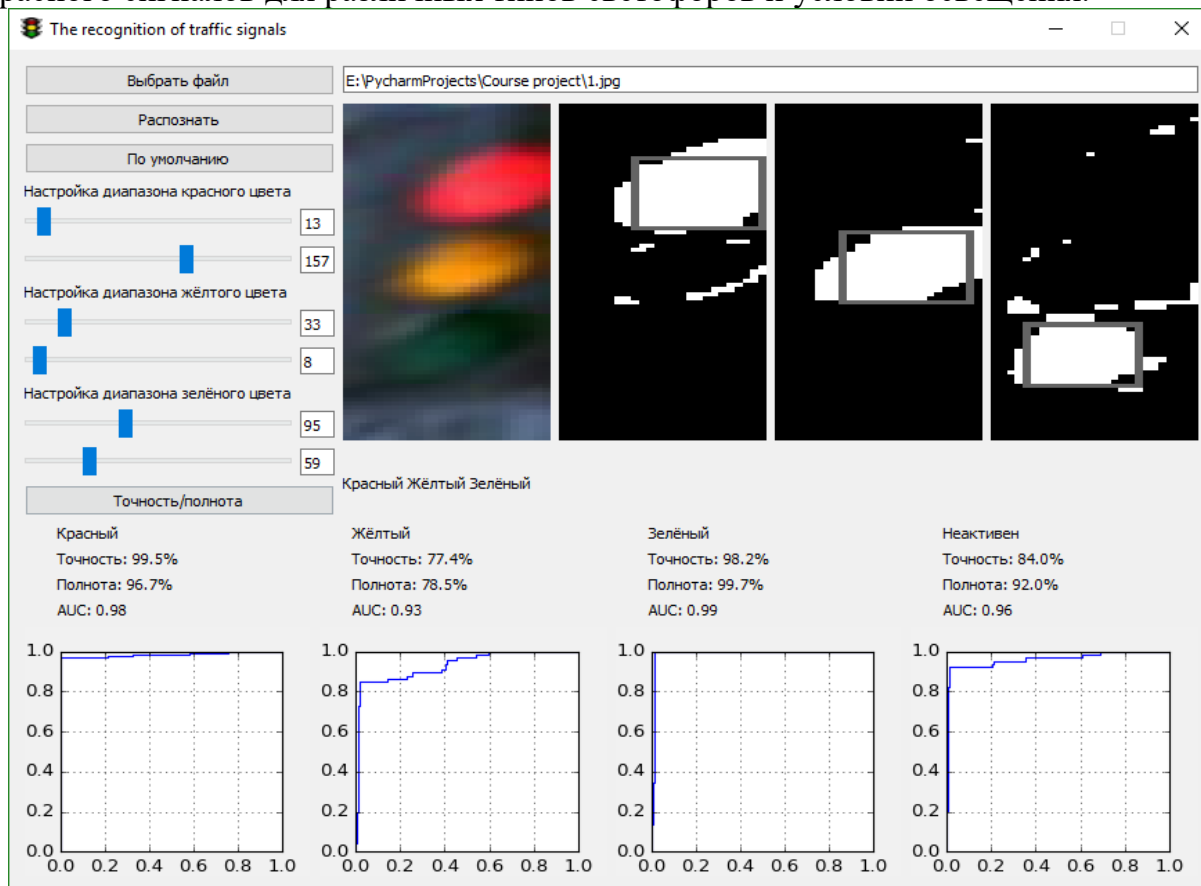


Рис. 3. Разработанное приложение для распознавания сигналов секций светофора на изображениях

Полученные результаты демонстрируют возможность применения для распознавания сигналов секций светофора относительно простого алгоритма анализа цветowych пятен на изображении. Кроссплатформенная программная реализация разработанного алгоритма пригодна для решения задач анализа изображений бортовой системы технического зрения транспортных средств. В то же время результаты свидетельствуют о необходимости совершенствования алгоритма и проверки его работоспособности на больших наборах изображений.

#### Библиографический список

1. Юдин Д.А., Горшкова Н.Г., Кныш А.С. Фролов С.В. Распознавание транспортных средств и регистрация их траектории движения на последовательности изображений // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова.2016. №6. С.139-148.
2. Yudin D., Slavioglo D. Usage of Fully Convolutional Network with Clustering for Traffic Light Detection // 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO'2018. 2018. С. 242-247.
3. Zhang W. Advanced Technology in Teaching / Berlin: Springer. 2012. 790 с.
4. RGB. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RGB> (дата обращения: 20.04.2018).
5. Thampi S. M. Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems / Berlin: Springer, 2017. 850 с.
6. Structural Analysis and Shape Descriptors – OpenCV. URL: [https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural\\_analysis\\_and\\_shape\\_descriptors.html?highlight=findcontours#findcontours](https://docs.opencv.org/2.4/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html?highlight=findcontours#findcontours) (дата обращения: 20.04.2018).
7. Lindner F., Kressel U., Kaelberer S. Robust Recognition of Traffic Signals // Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Italy. 2004. С. 49-53.
8. Duda R., Hart P., Stork D. Pattern Classification / John Wiley & Sons. 2001. 625 с.
9. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В., Осоков М.В., Моржин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий // М. Физматкнига. 2010. 672 с.
10. Кривая ошибок. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=ROC-кривая> (дата обращения: 20.04.2018).

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРНОЙ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ СКЛАДСКИХ СИСТЕМ<sup>2</sup>**

**А.Г. Бажанов, Д.А. Бушуев, А.С. Пикалов, С.В. Алексеевский**  
*Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,  
Россия, Белгород, all\_exe@mail.ru*

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы моделирования сенсорной подсистемы мобильной платформы во взаимодействующих средах MSC.Adams и Matlab с последующей проверкой адекватности. Работа позволяет выполнить достоверный учет характеристик объекта при моделировании его работы для полноценного анализа функционирования в реальной транспортно-складской системе.

*Ключевые слова:* автономные транспортные средства, складское хозяйство, моделирование, роботизированная платформа, сенсорная подсистема.

## **THE SENSOR SUBSYSTEM MODELING FOR AUTOMATIC GUIDED VEHICLE IN THE WAREHOUSE SYSTEM**

**A.G. Bazhanov, D.A. Bushuev, A.S. Pikalov, S.V. Alekseevsky**  
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Belgorod, Russia, all\_exe@mail.ru*

*Abstract.* Article considers the problem of sensor subsystem modeling for mobile automatic platform in interacting software packets MSC.Adams and Matlab with following adequacy verification. This work allows us performing a reliable object characteristics accounting when modeling its work for a full analysis of its functioning in a real transport-warehouse system.

*Keywords:* automatic guided vehicle, warehouse system, modeling, robotic platform, sensor subsystem.

На сегодняшний день роботизация является одним из ключевых направлений развития технологий, которая охватывает все сферы деятельности человека. Роботы новых поколений активно внедряются в автомобильной, аэрокосмической, пищевой промышленности, фармацевтике, строительстве и металлообработке, не являясь исключением и автоматизированные склады. Создание современной инфраструктуры промышленного склада или сортировочного пункта значительно повышает прибыльность и эффективность работы любого предприятия. В нашем случае мобильная роботизированная платформа выступает основной единицей автоматизации такого помещения. Для создания, отладки и запуска, как правило, продельвается значительный объем работ, связанный с подбором всех необходимых элементов роботизированной системы. Исходя из них, можно выделить следующие стадии реализации:

- формирование ТЗ;
- проектирование;
- реализация проекта;
- проверка работоспособности системы;
- функционирование.

Набор этапов требует значительного вложения сил для создания требуемого проекта, его отладки и коррекции получившейся системы. Часто именно этап коррекции приносит дополнительные затраты, что снижает дальнейшую экономическую эффективность проекта [1].

---

<sup>2</sup> Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

Предлагаемый подход предполагает использование системы моделирования для виртуальной отладки работоспособности внедряемой системы навигации, в том числе для обеспечения длительной работы всей системы без обслуживания или ремонта. В данной статье проводится параллель между математической моделью сенсорной подсистемы и реальными датчиками/модулями, оценивается точность этого соответствия. Модель и прототип мобильной платформы изображены на рис. 1.



Рис. 1. Мобильная платформа: а – цифровая модель, б – физический прототип

Рассмотрим функционирование транспортного средства в складском помещении. Ориентация мобильной платформы происходит по металлизированным линиям [2], встроенным в пол помещения, с дополнением в виде точек на базе RFID-меток. Для определения направления отклонения используются индуктивные дискретные датчики, а для вычисления величины отклонения от линии – аналоговый индуктивный датчик ДПА Ф60 40У 2110 Н. На основании статической характеристики получим математическую модель датчика. Во время эксперимента использовались обозначения, указанные на рис. 2.

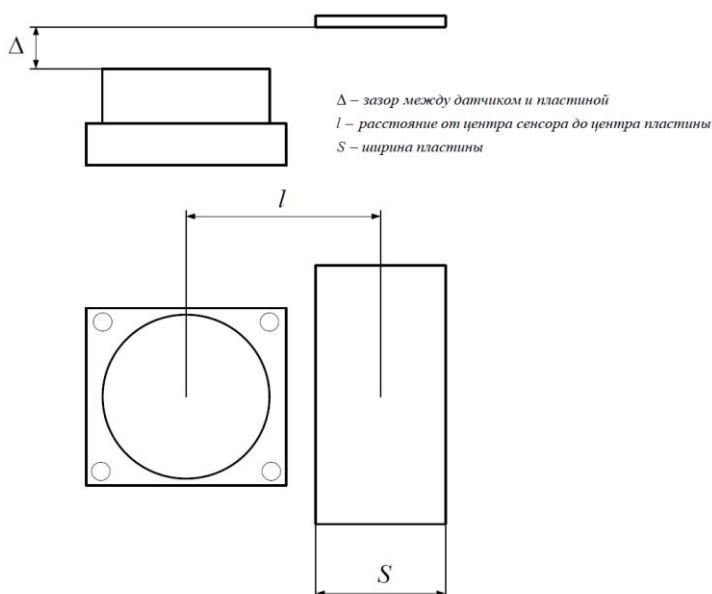


Рис. 2. Условные обозначения при проведении эксперимента

помещению используется система RFID-меток, которые содержат номер текущей контрольной точки и ее окружение. Считать необходимую информацию для принятия решения можно при помощи RFID-считывателя типа RC522.

Выполнено два опыта с различными видами пластин. Эксперименты проводились с питающим напряжением  $U_n = 24$  В. Статические характеристики индуктивного датчика приведены на рис. 3 (а – с трассой на базе стальной пластины шириной 18 мм, б – на базе жестяной пластины шириной 50 мм).

Как видно, зависимость выходного напряжения датчика ( $R = 270$  Ом) от расстояния до пластины описывается колоколообразными функциями.

Для навигации мобильной платформы по складскому

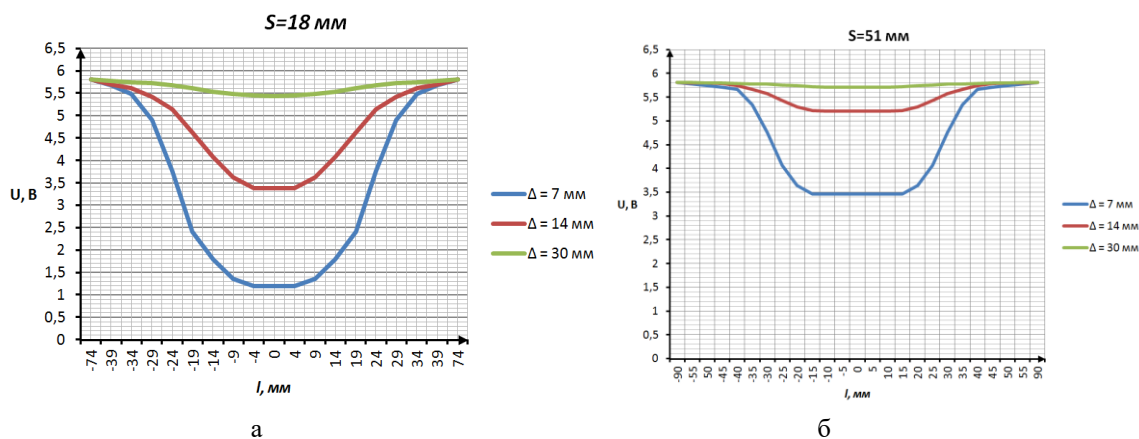


Рис. 3. Статические характеристики: а – стальная пластина, б – металлическая пластина

Схема подключения модуля RC522 к микроконтроллеру изображена на рис. 4. RFID-считыватель подключен с использованием последовательного интерфейса SPI. В стандартной библиотеке отсутствует функционал для извлечения требуемого байта памяти метки, поэтому написана подпрограмма, реализующая метод, позволяющий выполнить эту операцию. Это особенно актуально, так как количество информации для считывания непосредственно влияет на скорость работы системы в реальности.

Считыватель содержит передатчик и антенну, при помощи которых излучается электромагнитное поле определенной частоты. Попавшие в зону действия считывающего поля радиочастотные метки «отвечают» собственным сигналом, содержащим информацию (идентификационный номер товара, пользовательские данные и т. д.).

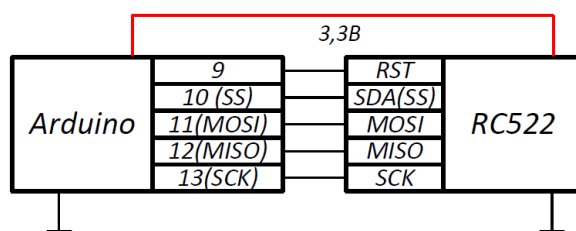


Рис. 4. Схема подключения RFID-считывателя к отладочной плате на базе Arduino

Сигнал улавливается антенной считывателя, далее информация расшифровывается и передается в контроллер для обработки. Подавляющее большинство современных систем контроля доступа (СКД) используют в качестве средств доступа идентификаторы, работающие на частоте 125 кГц, поэтому они выбраны как наиболее распространенные и проверенные средства обозначения контрольных точек.

Индуктивный датчик можно представить безынерционным динамическим звеном, поэтому для получения его математической модели необходимо получить и аппроксимировать его статическую характеристику  $U_{вых} = f(l_{вх})$ , где  $l_{вх}$  – расстояние между центром датчика и металлической пластиной. В качестве исходных данных возьмем график на рис. 3 ( $D=14$  мм, стальная пластина). Относительную ошибку аппроксимации будем вычислять по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{U_{выхi} - \hat{U}_{выхi}}{U_{выхi}} \right| \cdot 100\% ,$$

где  $U_{выхi}$  – значения согласно эксперименту;  $\hat{U}_{выхi}$  – значения, рассчитанные по формуле (1);  $N$  – количество точек,  $i$  – порядковый номер.

В качестве критерия для выбора аппроксимирующей функции будем использовать минимум относительной ошибки аппроксимации

$$I = \varepsilon \rightarrow \min_{\Omega},$$

где  $\Omega$  – множество рассматриваемых функций.

Для получения аппроксимирующей функции использованы возможности пакета Matlab (см. рис. 5) [3].

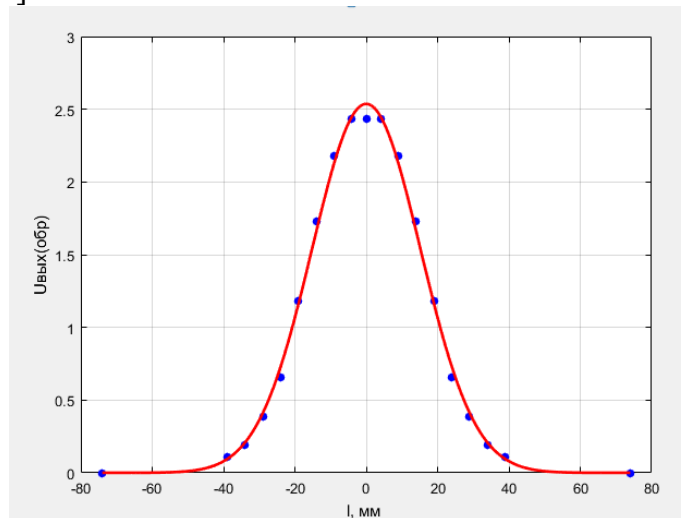


Рис. 5. Аппроксимация экспериментальных данных

В результате проведенной аппроксимации статическую характеристику датчика для стальной пластины с зазором можно представить следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = 5.81 - 2.537 \cdot e^{-(l/21.5)^2} = 5.81 - 2.537 \cdot e^{-(l^2/462.25)}. \quad (1)$$

Относительная ошибка аппроксимации для функции вида (1)  $\varepsilon = 0.846\%$ , что свидетельствует о ее достаточной точности.

Результаты моделирования идеализированного сенсора, представленного линейной статической характеристикой с зоной насыщения, приведены на рис. 6.

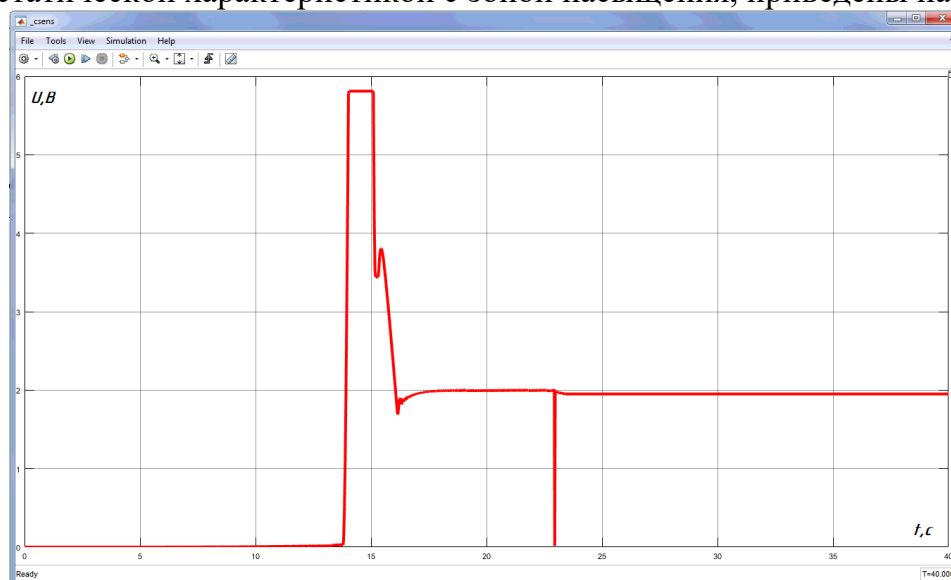


Рис. 6. Работа системы с идеализированной характеристикой сенсора

Моделирование работы установленного на платформе сенсора с реальной характеристикой изображено на рис. 7.

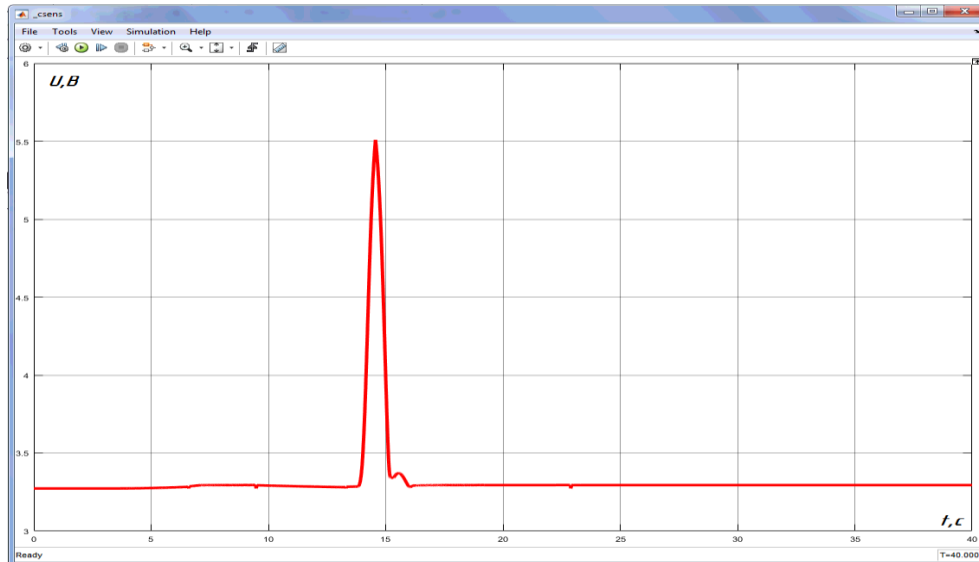


Рис. 7. Работа системы с реальной характеристикой датчика

Следует отметить, что получение выходного сигнала с датчика происходило при движении мобильной платформы по маршруту, описываемому контрольными точками, сформированными по номерам RFID-меток [1 63 70 69 68 51], обозначенных на модели складского помещения (см. рис. 8).

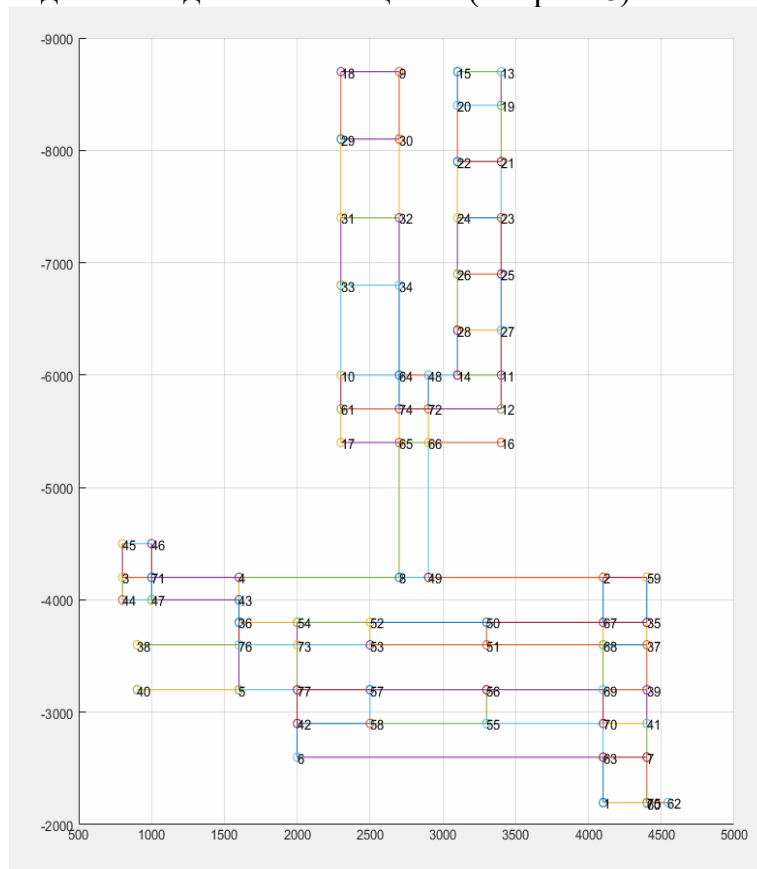


Рис. 8. Модель склада в Matlab

Результат моделирования работы RFID-считывателя представлен на рис. 9.

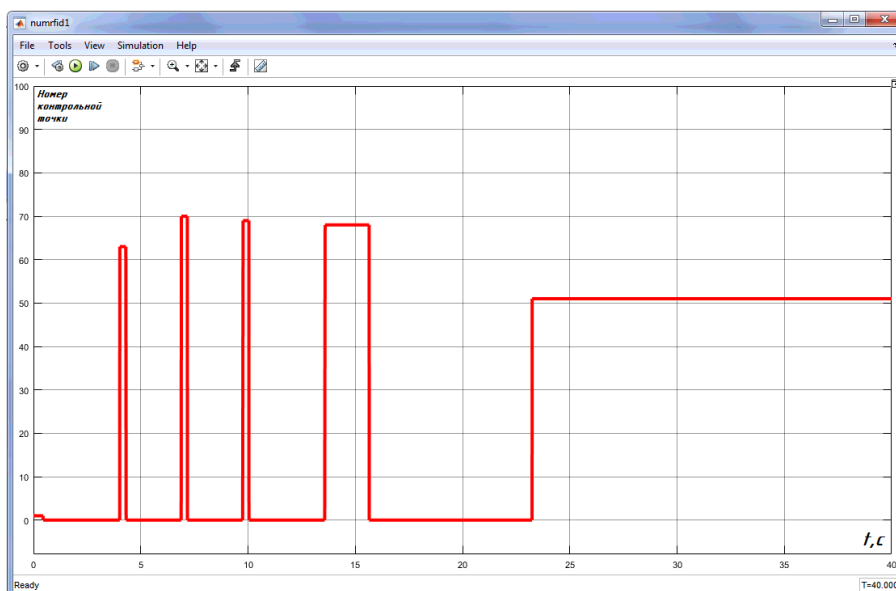


Рис. 9. Моделирование работы RFID-считывателя

Для принятия решения на перекрестке использовалась информация о нарастающем фронте импульса и его амплитуде.

В процессе работы получили математическую модель сенсорной подсистемы роботизированной тележки и убедились в ее адекватности (модель RFID-считывателя выполняет все функции, возложенные на реальный сенсор, а относительная ошибка аппроксимации для индуктивного датчика составляет  $\varepsilon = 0.846\%$ , что свидетельствует о высокой точности соответствия объекта и модели [4]), следовательно, в дальнейших разработках можно использовать полученное математическое описание. В частности, полученные модели внедрены в моделирующую среду MSC.Adams для создания полноценной симуляции работы транспортно-складской системы, в том числе для моделирования различного рода отказов.

#### Библиографический список

1. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельманов Р.Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб: Наука. 2001. 227 с.
2. Добринский Е.П., Бушуев Д.А., Магергут В.З., Бажанов А.Г. Разработка автоматизированной транспортно-складской системы с групповым управлением робокаров // 7-ой междун. симпозиум Экстремальная робототехника – робототехника для работы в условиях опасной окружающей среды. 2013. С. 410 – 418.
3. Левитин А.В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. М.: Вильямс. 2006. 576с.
4. Шихалёв А.М. Регрессионный анализ. Парная линейная регрессия. Казань: Казан. ун-т. 2015. 46 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ADAMS И MATLAB<sup>3</sup>

**В.А. Порхало\***, **В.Г. Рубанов\*\***, **С.В. Костин\*\*\***

\* *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
Россия, Белгород, porhalo@mail.ru*

\*\* *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
Россия, Белгород, vgrubanov@gmail.com*

\*\*\* *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
Россия, Белгород, serg.vlad1994@mail.ru*

*Аннотация:* Проведено моделирование перемещение робота по трассе, физическая модель робота была построена в среде Adams, а система управления продольным перемещением построена на базе оптимального алгоритма, синтезированного с использованием принципа максимума Понтрягина. Представлены результаты работы системы в среде MATLAB Simulink.

*Ключевые слова:* моделирование, мобильный робот, позиционное управление, оптимальные системы.

## SIMULATION OF THE CONTROL SYSTEM MOVING ROBOTIC PLATFORM WITH THE APPLICATION OF ADAMS AND MATLAB

**V.A. Porkhalo\***, **V.G. Rubanov\*\***, **S.V. Kostin\*\***

\* *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Russia, Belgorod, porhalo@mail.ru*

\*\* *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Russia, Belgorod, vgrubanov@gmail.com*

\*\*\* *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Russia, Belgorod, serg.vlad1994@mail.ru*

*Abstract.* Moving the robot along the track is modeled. The physical model of the robot was built in the Adams environment. The robot has a control system for moving along the track using an optimal algorithm developed using the Pontryagin maximum principle. The results of the system are presented in MATLAB Simulink.

*Keywords:* simulation, mobile robot, position control, optimal systems.

При разработке систем управления часто возникает задача проведения компьютерного моделирования, в некоторых случаях разработки физической модели. Современное программное обеспечение позволяет проводить эксперименты на виртуальных моделях высокой степени детализации, которые учитывают внешние воздействия на объект, которые присутствуют в реальных условиях. Одним из примеров такого программного обеспечения является среда разработки Adams MSC Software. При моделировании движения в Adams, преимуществом среды является то, что отсутствует необходимость введения законов поверхностного взаимодействия элементов модели, достаточно указать свойства материала, из которого изготовлена та или иная деталь. Система автоматически определяет массу, моменты инерции и другие необходимые параметры, которые в дальнейшем используются при расчёте модели в целом. Кроме того, Adams имеет возможность экспорта модели в MATLAB Simulink. Модель, построенная в САПР Adams, позволяет, минуя этап расчёта аналитической модели, учесть практически все факторы, влияющие на объект.

---

<sup>3</sup> Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта Госзадание №2.1396.2017/4.6.

Разработана физическая модель робокара в Adams, система управления для которой построена в MATLAB Simulink. Процесс моделирование движения роботизированной платформы состоит из следующих шагов: создания физической модели робокара в Adams, построения системы управления (реализация структуры системы управления и расчёт регуляторов), подключение полученной системы управления к физической модели и совместной симуляции. Рассмотрим подробнее каждый из этих этапов.

Робокар представляет платформу с ромбовидной схемой шасси (рис.1), с двумя ведущими колесами, расположенными на поперечной оси, проходящей через центр платформы, и двумя вспомогательными колёсами, расположенными на продольной оси. В робокаре используется привод с электродвигателем СЛ-621М, передача усилия от двигателей на колеса осуществляется на основе планетарных редукторов с передаточным числом 4,7.

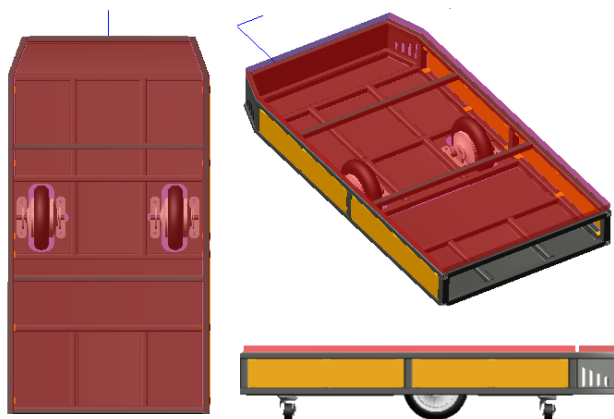


Рис. 1. Внешний вид модели роботизированной платформы в Adams

Рассмотрим структуру системы управления роботизированной платформой (рис. 2). В неё входят следующие элементы: оптимальный регулятор перемещения ОПР, электродвигатели ЭД, редукторы Р, исполнительные устройства ИУ (колеса), объект управления ОУ, который имеет два канала регулирования – по отклонению и продольному перемещению.

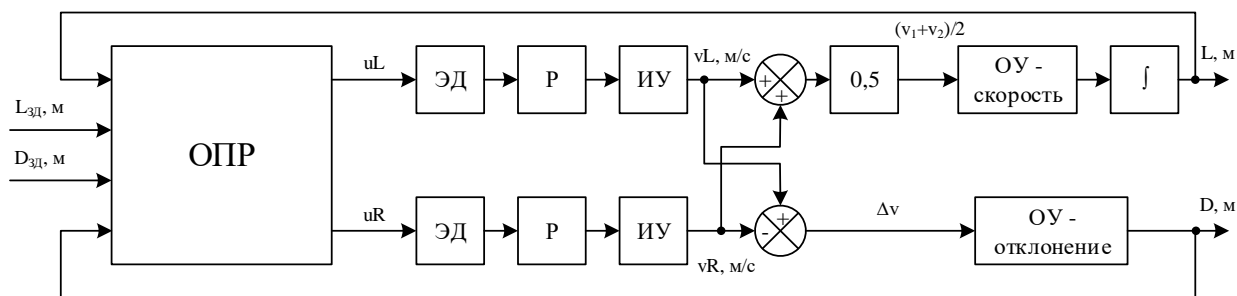


Рис. 2. Структура системы управления

Задача управления продольным движением заключается в своевременном торможении платформы с целью предотвращения столкновений, а также точное позиционирование относительно причалов. Эта задача может быть решена путём применения принципа максимума Понтрягина [1]. При исследовании динамики продольного движения роботизированной транспортной тележки используется математическая модель ромбовидной схемы шасси, представленная в [2, 3]. Оптимальный алгоритм управления продольным движением робокара синтезирован с использованием принципа максимума Понтрягина и имеет вид [4]:

$$u = -\text{sign}\left(x_1 - (\text{sign } x_2) \left(|x_2| + (1 - e^{|x_2|})\right)\right). \quad (1)$$

Следует отметить, что при проведении комплексного моделирования необходимо также настроить контур управления по отклонению. Для этого достаточно синтезировать модель системы управления, в которой объект управления будет представлять передаточные функции по каждому из каналов [5, 6]. Рассмотрим канал контроля отклонения тележки от заданной траектории. Так как управляющим воздействием в этом случае является разность скоростей вращения колёс, а выходной координатой отклонение от трассы, то передаточная функция будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{V_T(1+Ts)}{s^2}.$$

где  $T = \frac{d}{V_T}$ ,  $d$  – расстояние от середины ведущей оси до датчика наведения.

Подставляя значения параметров (продольная скорость  $V_T=1.5$  м/с,  $d=0.49$  м,  $T=0.327$  с), входящих в передаточную функцию, получим:

$$W(s) = \frac{1.5(1+0.327s)}{s^2}.$$

Передаточная функция двигателя, получаемая из модели двигателя постоянного тока, имеет вид:

$$W(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_{об}}{T_m s + 1} = \frac{2.438}{0.499s + 1},$$

где  $K_{об} = \frac{1}{K_{эм}}$  – коэффициент передачи двигателя,  $T_m = \frac{JR}{K_{эм}^2}$  – электромеханическая постоянная времени.

В работе [4] представлен вывод передаточной функция объекта управления (тележки) по каналу скорости при продольном движении, которая для рассматриваемой модели ( $m = 63.7$  кг) имеет вид:

$$W(s) = \frac{K_n}{Ts + 1} = \frac{3.897}{0.036s + 1}.$$

В случае, если требуется передаточная функция по каналу перемещения, то необходимо добавить последовательно включённое интегрирующее звено.

Располагая передаточными функциями элементов системы управления, можно составить модель в Simulink, соответствующую схеме, представленной на рис. 2, с помощью которой, сняв необходимые характеристики, настроить регуляторы по каждому из каналов управления, воспользовавшись одной из методик выбора оптимальных параметров. Установив настроенный регулятор отклонения и оптимальный позиционный регулятор перемещения, реализующий функцию регулирования (1) в систему управления физической моделью (рис. 3) и осуществив совместную симуляцию, получим следующие переходные процессы продольного перемещения робота и управляющего сигнала на исполнительные механизмы (рис. 4).

Как видно из результатов моделирования, оптимальный позиционный закон управления, реализующий принцип максимума, отрабатывает задание с требуемыми показателями качества. В связи с этим, предложенный алгоритм можно использовать при технической реализации системы управления продольным перемещением мобильных роботов. Описанный оптимальный регулятор продольного перемещения может быть также использован в целях предотвращения столкновений при движении нескольких роботизированных платформ.

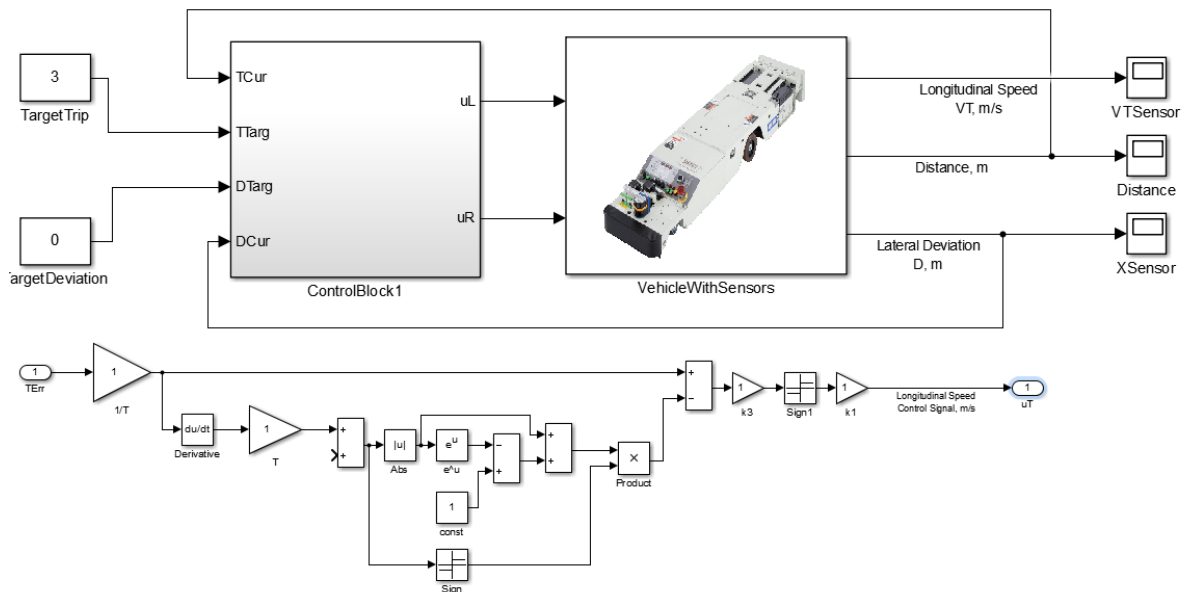


Рис. 3. Система управления моделью в MATLAB Simulink с передачей данных в Adsms: общий вид и структура оптимального регулятора перемещения

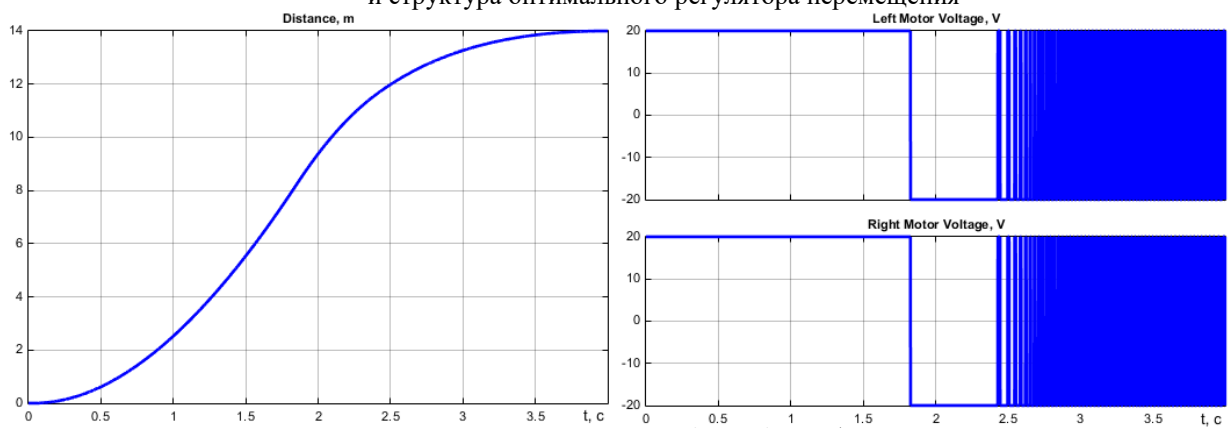


Рис. 4. Результат моделирования работы системы управления с оптимальным позиционным регулятором по перемещению

Совместное моделирование работы системы управления объектом с применением Matlab и Adams является удобным инструментом для исследования динамики объекта управления, так как нет необходимости в изготовлении и отладке физической модели, а также есть возможность учесть физические эффекты без разработки сложной аналитической модели. Такое моделирование технических объектов можно рекомендовать как этап проектирования систем управления в учебных, научных и производственных целях.

#### Библиографический список.

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматиздат. 1969. 384 с.
2. Sethi S.P., Thompson G.L. Optimal control theory: applications to management science and economics. Springer. 2005. 521 p.
3. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений: сб трудов. науч. конф. ВСПУ-2014 / Инст. пробл. управ. им. В.А. Трапезникова РАН. Москва: Изд-во ИПУ РАН. 2014. С. 67-78.
4. Порхало В.А., Рубанов В.Г., Костин С.В. Повышение живучести роботизированных транспортных средств на автоматизированном складе // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.4 / под общ. ред. А.А. Большакова. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2017. 140 с.
5. Рубанов В.Г., Луакурва Дж.П., Порхало В.А. Моделирование динамики движения мобильного робота в среде Matlab // Известия ТулГУ. 2006. № 1. С. 126-134.
6. Yudin D.A., Postolsky G.G., Kizhuk A.S., Magergut V.Z. Mobile Robot Navigation Based on Artificial Landmarks with Machine Vision System // World Applied Sciences Journal. 24 (11). 2013. p. 1467-1472.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЗУБЧАТО-РОЛИКОВОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ

И.А. Пушкарев<sup>1</sup>, Т.А. Пушкарева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия, Ижевск, pia10no@mail.ru

<sup>2</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия, Ижевск, pta2800@mail.ru

*Аннотация.* Рассмотрена структура планетарных передач с роликовым механизмом снятия движения. Найдены заменяющий механизм в обращенном движении и радиус центроиды ролика в его относительном движении. Получены упрощенные выражения для нормальных сил, действующих на ролики. Сделан вывод о характере изменения нормальных сил.

*Ключевые слова:* планетарная передача, роликовый механизм, структурный анализ, динамика.

## RESEARCH OF STRUCTURE AND DYNAMICS OF TEETH-ROLLER PLANETARY GEAR

I.A. Pushkarev<sup>1</sup>, T.A. Pushkareva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk state technical university, Russia, Izhevsk, pia10no@mail.ru

<sup>2</sup>Kalashnikov Izhevsk state technical university, Russia, Izhevsk, pta2800@mail.ru

*Abstract.* The structure of planetary gears with roller mechanism for torque absorption from the satellite is considered. The replacing mechanism in the inversed movement and roller centroid radius in its relative movement are found. The simplified expressions for the normal forces operating on rollers are received. The conclusion is drawn on the nature of change of normal forces.

*Keywords:* planetary transfer, roller mechanism, structural analysis, dynamics.

Планетарные передачи используются во многих областях, обладая следующими достоинствами: малой массой и размерами; высоким передаточным отношением; возможностью передавать большие нагрузки. К планетарным передачам типа  $K-h-V$  относятся передачи с роликовым механизмом снятия движения (рис. 1) [1–4].

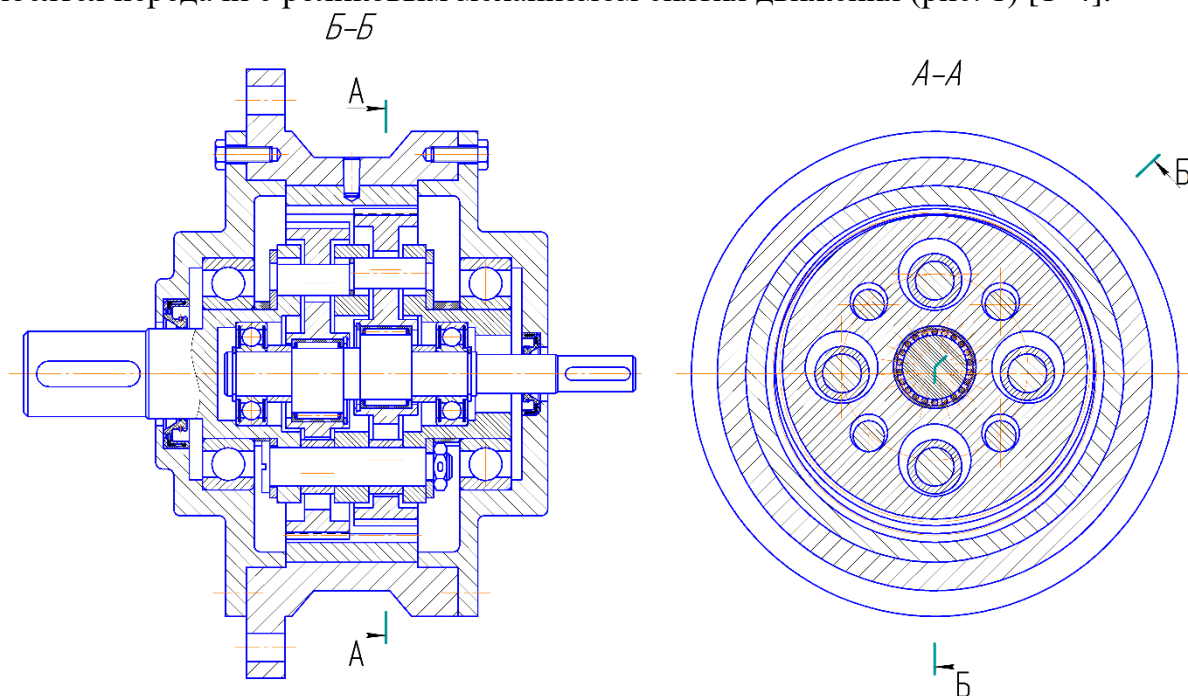


Рис. 1. Планетарная передача типа  $K-h-V$  с роликовым механизмом снятия движения [1, 2]

Несмотря на преимущества ролико-зубчатых передач, заключающиеся в простоте конструкции и изготовлении; отсутствии скольжения роликов по поверхностям отверстий в сателлите и диске, соединенном с выходным валом; возможности передавать значительные нагрузки, им уделено незначительное

внимание. Так, можно назвать несколько работ, посвященных этим передачам, например, [3, 4]. В работах [3, 4] рассмотрена кинематика передач, доказано постоянство передаточного отношения при числе роликов, большем трех, найдено значение относительных сил, действующих на ролики при числе роликов  $n = 4, 6$  и  $8$ . Актуальной остается проблема исследования динамики подобной передачи.

В работе ставятся задачи: 1) структурного анализа механизма, заключающегося в поиске заменяющего механизма; 2) нахождения центроиды роликов; 3) упрощения выражений для нормальных сил, действующих на ролики в случае  $n = 3, 4, 6, 8$ ; 4) выяснения характера изменения нормальных сил.

Заменяющий механизм находится из соображений, что расстояние между центрами отверстий в сателлите и диске всегда должно быть равно эксцентриситету  $e$ , а радиус отверстия отличается от радиуса ролика на половину эксцентриситета:  $r_{отв} = r_{рол} + (e/2)$  (рис. 2). Центр относительного вращения совпадает с центром ролика, поэтому два дополнительных звена, соединенных шарниром в центре ролика, не вращаются друг относительно друга, и их можно заменить одним звеном. Таким образом, заменяющий механизм в обращенном движении представляет собой шарнирный параллелограмм (рис. 2б).

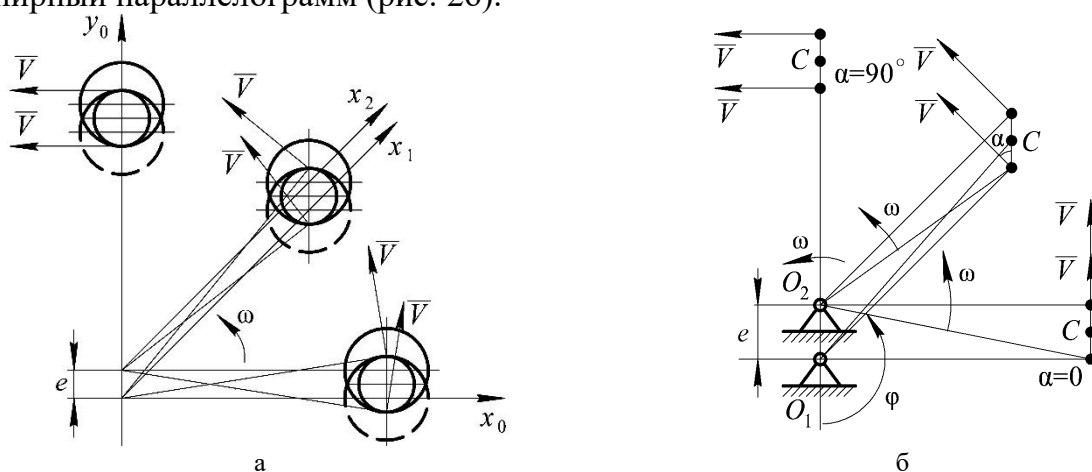


Рис. 2. Поле скоростей роликового механизма (а) и заменяющий механизм (б)

На заменяющем механизме хорошо видно, что угол давления  $\alpha$  постепенно уменьшается до  $0^\circ$  (наилучший случай), а затем увеличивается до  $90^\circ$  (когда передача нагрузки отсутствует). Центроида ролика в его относительном движении в обращенном механизме, показанная на рис. 3а, представляет окружность. Радиус центроиды  $r_1$  (рис. 3б) находится из геометрических соображений:

$$r_1 = r_0 - r_2; \quad r_2 / r_0 = C_v C / O_2 A = r_{рол} / r_{отв},$$

где  $r_2$  – расстояние от мгновенного центра скоростей до центра ролика;  $r_0$  – расстояние от оси сателлита до центра отверстия в сателлите;  $r_{отв}$  – радиус отверстия;  $r_{рол}$  – радиус ролика. При любом соотношении размеров должно выполняться условие  $r_{отв} = r_{рол} + (e/2)$ .

Таким образом, радиус центроиды  $r_1$  – величина постоянная, не зависящая от угла поворота  $\varphi$ .

В передаче работают только те ролики, которые в данный момент находятся на одной половине сателлита, разделенного диаметром, проходящим через оси вращения водила и сателлита (рис. 4).

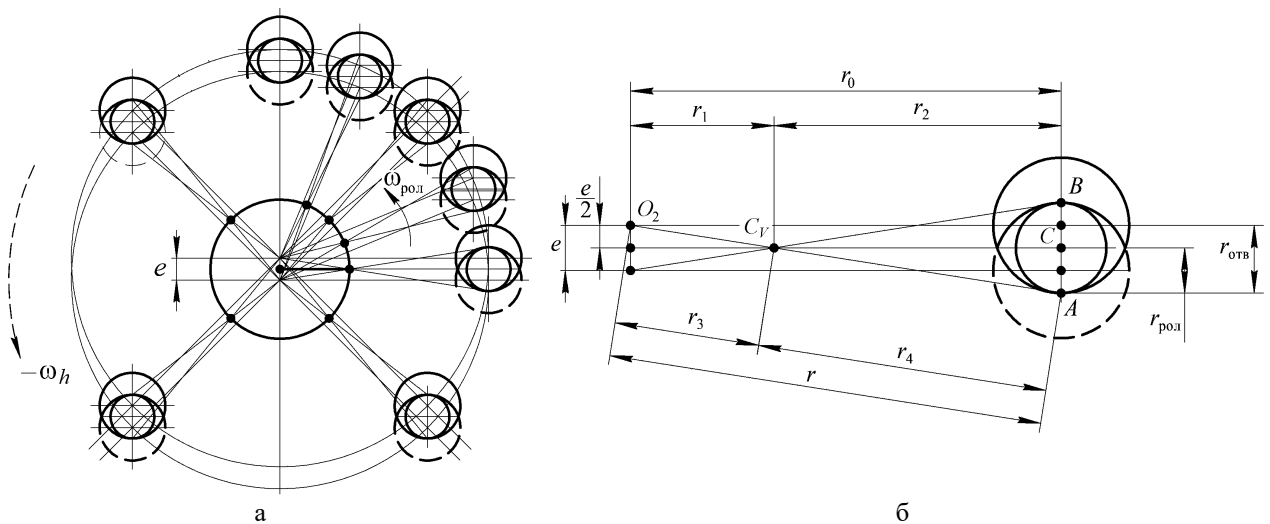


Рис. 3. Центроида ролика в относительном движении (а); радиус центроиды (б)

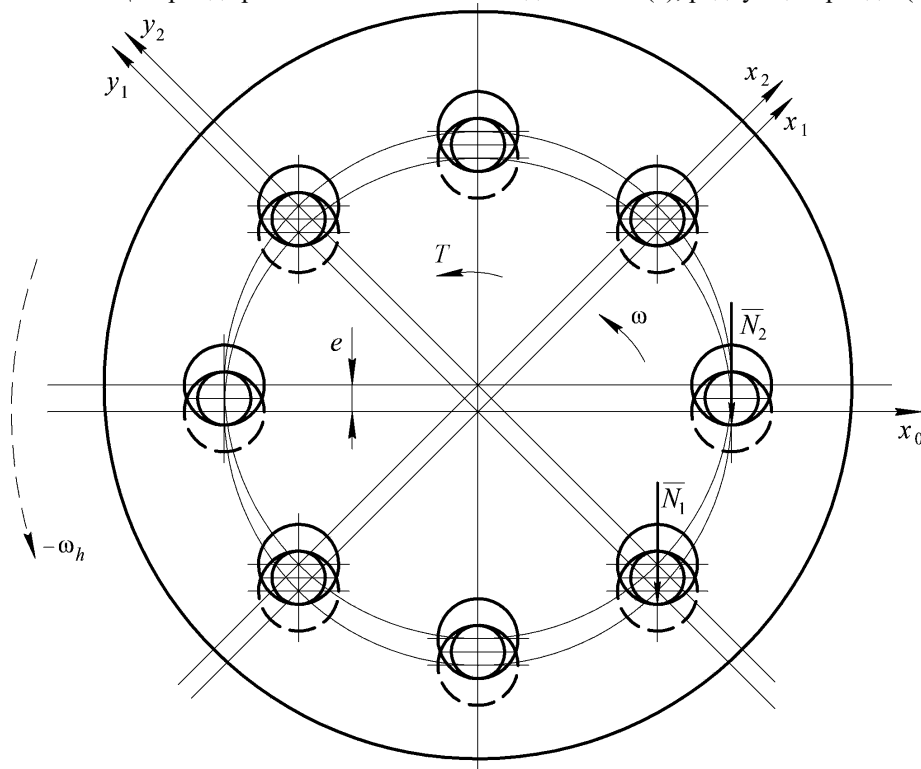


Рис. 4. Распределение сил в передаче с роликовым механизмом снятия движения

Задача нахождения нормальных сил  $N_j$ , действующих на ролики, является статически неопределимой, и решается методом перемещений. Считается, что зазоры одинаковы, и одинаковые ролики одновременно приходят в соприкосновение с сателлитом. Тогда их деформация также начинается одновременно:  $N_j = c\delta y_j$ , где  $c$  – жесткость роликов;  $\delta y_j$  – деформация ролика в месте контакта с сателлитом. Сателлит считается абсолютно жестким (по сравнению с роликом). Тогда его поворот, вследствие деформации роликов,  $\delta\varphi$ . В работе [3] получены выражения для нормальных сил. Эти формулы, в случае четного числа роликов, упрощаются:  $n = 4$ ,  $\bar{N}_1 = \sin\varphi$ ;  $\bar{N}_2 = \cos\varphi$ ;  $n = 6$ ,  $\bar{N}_j = (2/3)\sin[\varphi + (\pi/3)(j-1)]$ ;  $n = 8$ ,  $\bar{N}_j = 0,5\sin[\varphi + (\pi/4)(j-1)]$ . Здесь  $j$  – номер ролика;  $\bar{N}_j = N_j r_0 / T$  – относительная реакция;  $T$  – передаваемый сателлитом момент. При  $n = 3$  (случай трех роликов не

рассматривался в работе [3]) выражение для относительной силы не упрощается:

$$\overline{N}_j = \frac{\sin[\varphi + (2\pi/3)(j-1)]}{\sin^2 \varphi + \sin^2[\varphi + (2\pi/3)]};$$

изменение величины этой силы показано на рис. 5а.

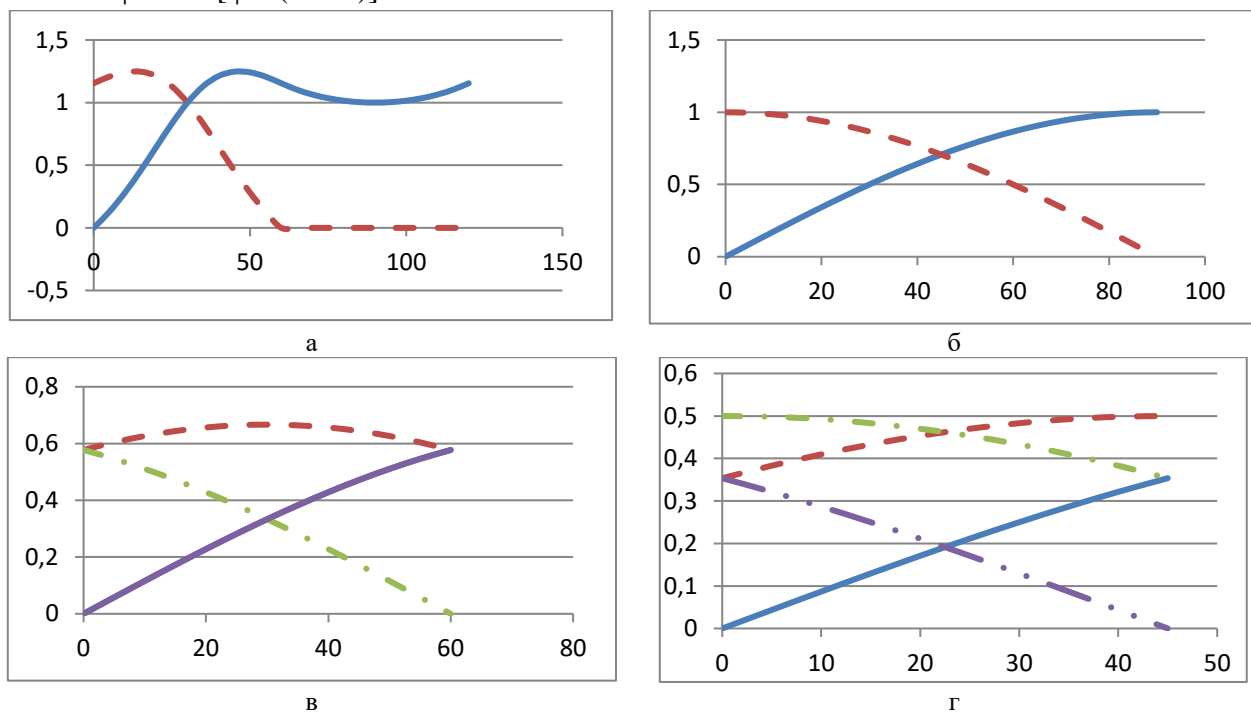


Рис. 5. Значение относительной нормальной силы при числе роликов  $n = 3$  (а),  $n = 4$  (б),  $n = 6$  (в),  $n = 8$  (г)

Из характера изменения сил, представленных на рис. 5, следует, что в роликовом механизме отсутствует резкое возрастание нормальных сил при смене фазы движения, то есть ролик, начинающий передавать нагрузку, воспринимает сначала нулевую силу, а величины сил, действующих на следующие ролики, не испытывают разрывов и резких изменений.

Таким образом, можно сделать следующие выводы в отношении структуры и динамики планетарных передач типа  $K-h-V$  с роликовым механизмом снятия движения. Заменяющий механизм и постоянный радиус центроиды ролика в относительном движении показывают, что относительная угловая скорость ролика постоянна. Это подтверждает утверждение, что ролики перекатываются по поверхностям отверстий без скольжения, не вызывая потерь мощности на трение. Характер изменения нормальных сил, действующих на ролики, указывает на отсутствие разрывов и резких изменений величин этих сил, что благоприятно сказывается на работе механизма. Минимально возможное количество роликов, при котором выполняются указанные выше условия, равно трем.

#### Библиографический список

1. Планетарная передача : Пат. 2402709, Рос. Федерация / Плеханов Ф.И., Веретенников Н.Д., Каркин Н.А., Казаков И.А. № 2009137003/11 ; заявл. 06.10.2009 ; опубл. 27.10.2010, Бюл. № 30.
2. Планетарная передача : Пат. 2460917, Рос. Федерация, / Плеханов Ф.И., Овсянников А.В. № 2010150216/11 ; заявл. 07.12.2010 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25.
3. Плеханов Ф.И., Овсянников А.В. Силовой расчет механизма восприятия момента зубчато-роликовой планетарной передачи // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 3. С. 26-29.
4. Овсянников А.В. Кинематика и показатели прочности планетарной передачи типа  $K-h-V$  с роликовым механизмом снятия движения : дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2012.
5. Plekhanov F., Pushkarev A., Pushkarev I. Influence of layout features and parameters of planetary gear on its dynamics and strength characteristics // Advanced Gear Engineering, Mechanisms and Machine Science, V. 51 / Goldfarb V., Trubachev E., Barmina N. (Eds). Springer International Publishing. 2018. p. 481–494.

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕНЗОТРЕМОРОГРАММ

**О.В. Жвалевский**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН),  
Россия, Санкт-Петербург, ozh@spiiras.ru*

*Аннотация.* Рассматривается проблема автоматизации диагностики болезни Паркинсона, основанной на математическом анализе тензотреморограмм. Ставится основная задача — построение системы распознавания, используемой для оценки функционального состояния человека. Предлагается концептуальная модель математической обработки тензотреморограмм и указывается место в этой концептуальной модели методов математического анализа временных рядов, методов математического моделирования и методов машинного обучения.

*Ключевые слова:* болезнь Паркинсона, тензотреморограмма, функциональное состояние, система распознавания, методы обработки, машинное обучение, спектральный анализ, мультифрактальный анализ, структурный анализ.

## FRAMEWORK FOR MATHEMATICAL TENZOTREMOROGRAMMS PROCESSING

**O.V. Zhvalevsky**

*Federal State Institution of Science St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,  
Russia, St. Petersburg, ozh@spiiras.ru*

*Abstract.* The Parkinson's disease diagnosis problem automation based on tenzotremorogramms processing are concerned. The main task is to design pattern recognition system for human function state estimation. The framework for mathematical tenzotremorogramms processing are proposed. Also, the methods of time series processing, mathematical modeling, and machine learning are described as closed part of proposed framework.

*Keywords:* Parkinson disease, tenzotremorogramma, functional state, recognition system, processing methods, machine learning, spectral analysis, multifractal analysis, structure analysis.

Автоматизированная диагностика болезни Паркинсона (БП) [1] предполагает регистрацию физиологических сигналов, несущих информацию о состоянии системы построения движений по Н.А. Бернштейну [2]. Непосредственную информацию о состоянии системы построения движений предоставляет тремор рук. С.П. Романов предложил использовать изометрический способ регистрации тремора [3], который предполагает непосредственную регистрацию усилия, оказываемого руками человека на две чувствительные платформы (по одной — на каждую руку), с каждой из которых связан свой пьезорезистивный тензодатчик. Изометрический способ регистрации исключает движения отдельных звеньев локомоторного аппарата, что обеспечивает получение объективных данных о системе построения движений. При регистрации используется биологическая обратная связь: с каждым датчиком связана своя метка на экране компьютера, а испытуемому необходимо, удерживать задаваемый врачом-клиницистом уровень усилия, и следить за тем, чтобы обе отображаемые метки совмещались. Таким образом, непосредственно регистрируются *произвольные колебания*, которые совершаются конечностями и описывают уровень удерживаемого человеком усилия; тремор — это компонент, который выделяется из произвольных колебаний на аппаратном уровне при помощи интегрирующего преобразования и описывает *непроизвольные колебания*, которые совершаются под непосредственным управлением системы построения движений. В соответствии с этим, будем называть сигналы, которые соответствуют тремору, *тензотреморограммами* (ТТГ), а сигналы,

которые соответствуют самому усилию и являются, по своей природе, исходными или «сырыми», буден называть, по аналогии с ТТГ, *тензофорсограммами* (ТФГ).

Методика проведения измерительного эксперимента, также предложенная С.П. Романовым, предполагает последовательное выполнение четырёх измерительных сеансов: вначале используется регистрация тремора с опорой на запястье (в этом случае система построения движений оказывается задействованной в наименьшей степени), затем используется регистрация тремора для вытянутых рук (в этом случае система построения движений оказывается задействованной в наибольшей степени); каждый способ регистрации используется дважды — при минимально возможном уровне удерживаемого испытуемым усилия (в этом случае система построения движений находится в минимально активном режиме функционирования) и при максимально возможном уровне удерживаемого испытуемым усилия (в этом случае система построения движений находится в максимально активном режиме функционирования). Таким образом, исследователь получает в распоряжение весьма разнообразные данные о системе построения движений. Эти данные включают и характер удержания каждой рукой заранее заданного врачом-клиницистом уровня усилия, и, непосредственно, сам тремор каждой руки, а также и информацию о том, как именно меняется характер удержания усилия и сам тремор при изменении уровня удерживаемого усилия (при переходе от минимального уровня удерживаемого испытуемым усилия к максимальному уровню удерживаемого испытуемым усилия) и изменении условий проведения измерительного эксперимента (при переходе от одного расположения рук при регистрации тремора к другому). Будем называть ТТГ, полученные в результате четырёх измерительных сеансов указанного выше вида *стандартными*.

Для того, чтобы автоматизировать диагностику БП, необходимо построить систему распознавания, основанную на математическом анализе ТТГ. Результаты математической обработки ТТГ [4, 5] свидетельствуют о том, что эти сигналы содержат точную и достоверную информацию о системе построения движений по Н.А. Бернштейну. Отсюда вытекает необходимость в проведении всестороннего математического анализа имеющихся временных рядов.

Целью математического анализа временных рядов является их классификация. Если найденные классы полностью соответствуют тем функциональным состояниям (ФС), в которых может находиться система построения движений, то задача построения системы распознавания окажется полностью решённой. В общем случае, система распознавания представляет собою систему решающих правил, которые основываются на различных свойствах анализируемых временных рядов. По существу, речь идёт о построении системы распознавания, которая позволяет с приемлемой для медицинской практики точностью относить испытуемых к одному из заранее заданных классов. В первом приближении, имеется бинарная классификация испытуемых: первый класс — класс практически здоровых испытуемых; второй класс — класс людей, у которых имеется определенная патология. Более точная классификация требует введения отдельных классов для людей, больных БП, для людей, больных синдромом паркинсонизма (СП), а также для людей, у которых имеется определённая патология, но эта патология не связана ни с БП, ни с СП. Люди, у которых имеется патология (БП или СП) оказываются, в результате приёма лекарственных препаратов, в «изменённом» ФС. Это усложняет классификацию испытуемых, т.к. приходится вводить отдельные классы как для «чистого» ФС, соответствующего ситуации с отменой приёма лекарственного препарата, так и для «изменённого» ФС, соответствующего «обычному» состоянию больного испытуемого.

Для каждой допустимой классификации испытуемых может быть построена система распознавания, при этом, в том случае, когда используется иерархическая классификация, схема распознавания будет иметь вид последовательности этапов, на каждом из которых рассматриваются испытуемые определённых классов. Здесь можно выбирать количество этапов, выбирать конкретные классы для каждого этапа и использовать на каждом этапе собственные критерии качества распознавания, свои решающие правила и т.д.

Что является *объектом* в системе распознавания?

Регистрируя физиологические сигналы в определённый момент времени, оцениваем ФС в момент регистрации. Оценивая ФС одного и того же испытуемого в различные моменты времени, получаем временной ряд оценок ФС и можем обнаружить момент, когда, изначально практически здоровый человек заболевает БП или СП. Кроме того, возможность получить несколько различных ТТГ для одного и испытуемого позволяет уточнить то, что является индивидуальной нормой для испытуемого, и построить его индивидуальный профиль. Таким образом, основными объектами являются временные ряды: ТТГ — это двумерный временной ряд, причём, можно отдельно рассматривать как ТТГ левой руки, так и ТТГ правой руки; аналогично, ТФГ — это двумерный временной ряд, причём, можно отдельно рассматривать как ТФГ левой руки, так и ТФГ правой руки. В соответствии с этим мы можем построить систему распознавания отдельно для каждого вида сигналов. Если рассматриваются сигналы только какого-то одного вида, то можно отдельно строить систему распознавания для сигналов, соответствующих левой руке, и систему распознавания для сигналов, соответствующих правой руке. Сравнительный анализ результатов распознавания, полученных для различных рук, может дать дополнительную информацию об испытуемых: ранние проявления БП и СП нередко могут начинаться на определённой половине, т.е. ассиметричны. Если сигналы обладают совершенно различными свойствами, и, поэтому, их не следует рассматривать при построении решающих правил как однородные данные. В этом случае, целесообразно использовать результаты обработки сигналов одного вида для обработки сигналов другого вида.

В действительности, в нашем распоряжении имеется четыре различных типа стандартных ТТГ, (и, соответственно, ТФГ), и для каждого такого типа может быть построена собственная система распознавания, при этом, имеется возможность выбрать из четырёх систем распознавания ту, которая является более эффективной. Далее, если рассматривать эти четыре системы распознавания как независимые, то можно построить систему решающих правил более высокого уровня, которая обобщает результаты, полученные отдельными системами распознавания. В самом простом варианте реализации такой схемы применяется процедура голосования. Таким образом, имеется иерархия (типов) объектов: на нижнем уровне иерархии находятся отдельные ТТГ; на среднем уровне иерархии находится блок экспериментальных данных, состоящий из четырёх стандартных ТТГ; на верхнем уровне находятся экспериментальные данные, полученные для отдельного испытуемого или для некоторого класса испытуемых. Это означает, что создаваемая система распознавания должна быть многоуровневой.

Существует три различных варианта реализации системы распознавания, основанной на математическом анализе физиологических сигналов.

Первый вариант реализации системы распознавания заключается в непосредственной обработке анализируемых временных рядов. В этом случае,

классификация временных рядов основывается либо на вычислении отдельных характеристик, позволяющих различать временные ряды, относящиеся к различным классам, либо на построении тех или иных спектральных представлений, позволяющих использовать для классификации спектральный состав или форму спектра, либо на анализе внутренней структуры, позволяющей получить представление временного ряда в форме, наиболее удобной для построения решающих правил. В соответствии с этим, имеется три различных подхода к анализу временных рядов.

Первый подход к анализу временных рядов заключается в вычислении отдельных числовых характеристик, описывающих те или иные свойства анализируемых временных рядов. Если, например, использовать понятие вариационного размаха, то можно построить фрактальную идентификационную шкалу, которая хорошо подходит для классификации временных рядов с известными распределениями [6]. Другим возможным информативным признаком, позволяющим классифицировать временные ряды, может быть фрактальная размерность. Основная гипотеза состоит в том, что состоянию в норме соответствуют процессы с более простым управлением и, соответственно, с более длинной памятью, а, значит, и с меньшей фрактальной размерностью, в то время как различным видам патологии соответствуют процессы с более сложным управлением, то есть, процессы с более короткой памятью, а, значит, и с большей фрактальной размерностью. Фрактальную размерность удобнее всего оценивать при помощи линейно связанного с ней показателя Хёрста [7]. В свою очередь, значение самого показателя Хёрста может быть оценено как при помощи оригинального (авторского) алгоритма, который предполагает непосредственную обработку отсчётов анализируемого временного ряда с применением скользящего окна [8], так и на основе метода анализа флуктуаций для временных рядов с исключённым трендом (англ. Detrended Fluctuation Analysis, DFA) [9]. Другой способ оценки фрактальной размерности основан на применении вейвлет-преобразования [10] и специального метода максимума модулей вейвлет-преобразования [11]. Проведённые вычисления показывают, что оценка фрактальной размерности для здоровых людей и для людей, больных БП, значимым образом различается, что подтверждает правомерность основной гипотезы [4].

Второй подход к анализу временных рядов заключается в построении разложений анализируемых временных рядов по различным системам функций и построении всевозможных спектров. Спектральные методы анализа временных рядов обладают рядом недостатков. Во-первых, спектральный анализ применяется для стационарных процессов, в то время как те же ТТГ представляют собою, как и большинство сигналов биологического происхождения, реализации нестационарных процессов. Эта проблема может быть решена, в отдельных случаях, при помощи сегментации. Во-вторых, спектральные разложения не позволяют выявлять внутреннюю структуру анализируемых временных рядов. В частности, спектральные методы не предназначены для локализации отдельных событий, которые могут содержаться в анализируемых временных рядах на различных масштабах. Эта проблема преодолевается при помощи вейвлетов, которые позволяют получить представление временных рядов в частотно-временной области. В-третьих, сами по себе спектральные разложения не дают полной и точной информации о наблюдаемой системе (в нашем случае: о системе построения движений), и не позволяют получать устойчивые числовые характеристики, которые можно использовать для построения решающих правил. Даже если мы используем такие специализированные функции как функции Уолша, Адамара и Радемахера, которые могут лучше учитывать «природу»

анализируемых временных рядов, всё преимущество использования таких функций сводится к повышению вычислительной эффективности алгоритмов и к повышению точности и достоверности отдельных числовых характеристик. В этом смысле, наиболее «продвинутом» вариантом спектрального анализа является мультифрактальный анализ [12], в рамках которого строится сингулярный спектр, позволяющий связать воедино статистические свойства анализируемых временных рядов и их внутреннюю структуру. В частности, построение сингулярного спектра ТТГ, позволяет увидеть фундаментальные различия между ФС «в норме» и ФС «в патологии» [5].

Третий подход к анализу временных рядов основан на классификации (кластеризации) фрагментов анализируемых временных рядов. Результатом кластеризации является алфавит, каждая буква (символ) которого соответствует определённому классу фрагментов. Каждому временному ряду таким образом можно сопоставить собственный алфавит и собственное представление временного ряда виде последовательности символов соответствующего алфавита. При реализации такого, по своей сути, лингвистического подхода, широко используются алгоритмы обработки символьных последовательностей, позволяющие выявлять наиболее характерные «слова» или, даже, «грамматические конструкции». В соответствии с этим, классификация целых временных рядов может быть сведена к сравнительному анализу алфавитов, соответствующих различным ФС. Предельным вариантом реализации лингвистического подхода является полная «реконструкция» гипотетической «грамматики» «языка», который «стоит» за процессом порождения временных рядов.

Второй вариант реализации системы распознавания заключается в применении методов машинного обучения. Методы машинного обучения основаны на формировании обучающих выборок экспериментальных данных, построении соответствующих им матриц типа «объект-свойство», содержащих значения потенциально информативных признаков, и применении специальных алгоритмов отбора информативных признаков. В качестве потенциально информативных признаков выступают числовые характеристики, получаемые при применении методов математического анализа временных рядов. Результатом машинного обучения являются решающие правила, отражающие значимые закономерности, имеющиеся в экспериментальных данных, а также информативные признаки, фигурирующие в найденных решающих правилах. Отобранные информативные признаки и соответствующие им алгоритмы вычисления каждого признака используются, затем, при обработке новых физиологических сигналов.

Центральная проблема машинного обучения — это проблема обобщающей способности формируемых при помощи алгоритмов машинного обучения систем решающих правил. Эта проблема становится особенно актуальной при наличии малых выборок экспериментальных данных. Во-первых, малый объём выборки экспериментальных данных, скорее всего, говорит о том, что данная выборка не является репрезентативной. В такой ситуации могут показывать наилучшие результаты такие элементарные методы, как, например, метод ближайшего соседа, метод потенциальных функций [13] и другие чисто геометрические методы, вроде метода локальной геометрии [14]. Во-вторых, даже применение методов, специальным образом предназначенных для работы с малыми выборками, не гарантирует устойчивости результатов распознавания. В-третьих, объекты различных классов могут быть настолько плотно перемешаны в признаковом пространстве, что гипотеза компактности [15], которая является исходной при применении большинства методов

машинного обучения не будет выполняться. Если для некоторой начальной «малой» выборки экспериментальных данных нарушение гипотезы компактности может быть не таким заметным, то, при пополнении выборки новыми экспериментальными данными, построенные ранее решающие правила, скорее всего, окажутся несостоятельными. Наконец, в-четвёртых, возникает вопрос о том, является ли случайным процесс выбора объектов выборки. Если, наоборот, имеются значительные объёмы экспериментальных данных, когда можно найти достаточное количество объектов каждого класса, и, также, имеется информация о том, является ли выбор объектов выборки экспериментальных данных случайным, используются методы глубокого обучения, основанные на применении многослойных нейронных сетей [16]. В настоящее время методы глубокого обучения активно развиваются и доказывают свою успешность при обработке временных рядов различной природы. В то же время, имеются существенные трудности в интерпретации полученных при помощи методов глубокого обучения результатов.

Гипотезу компактности можно использовать как критерий допустимости заданного признакового описания и выбирать только те признаковые описания, которые изначально (для полного набора потенциально информативных признаков) удовлетворяют гипотезе компактности. Подход, противоположный данному, заключается в применении целого набора методов математического анализа временных рядов, и вычислении множества весьма различных потенциально информативных признаков, связанных с различными свойствами анализируемых временных рядов. В этом случае, мы получаем ансамбль «слабых» алгоритмов распознавания, который (в целом) позволяет существенным образом повысить обобщающую способность результатов распознавания [17]. В общем случае, когда используется значительное количество методов математического анализа временных рядов и такое же значительное количество методов машинного обучения, возникают значительные объёмы экспериментальных данных, даже в случае малых выборок. Такая ситуация естественным образом возникает, когда следуем метод математического анализа временных рядов и, варьируя его управляющими параметрами, получаем различные варианты наборов потенциально информативных признаков.

Третий вариант реализации системы распознавания заключается в применении методов математического моделирования. Применение методов математического моделирования позволяет связать между собою различные уровни многоуровневой системы распознавания при помощи задания зависимостей результатов распознавания одного уровня системы от результатов распознавания другого уровня системы. При этом, необходимо строить модели следующих трех типов. К первому типу относятся модели, описывающие структуру ФС. Это могут быть скрытые марковские модели: если предположить, что состоянию «в норме» соответствуют собственная структура ФС, а определенному виду патологии — другая, то, тогда, основная задача построения системы распознавания будет сводиться к выявлению и классификации скрытых состояний системы построения движений. При этом, важным оказывается не только и не столько набор скрытых состояний, сколько схема переходов между ними. Ко второму типу моделей относятся модели, описывающие систему построения движений. Эти модели необходимы для того, чтобы выявить те неявные (скрытые) управляющие параметры, которые соответствуют каждому ФС. К третьему типу относятся модели, описывающие сами временные ряды. Представляется целесообразным использовать подход к описанию временных рядов, основанный на событиях [18]. В этом смысле, методы математического анализа временных рядов следует рассматривать как методы препроцессинга. Методы препроцессинга временных рядов позволяют перейти от

представления временных рядов в виде упорядоченной во времени последовательности отсчётов к представлению, более удобному для построения решающих правил. Такие представления должны обладать свойством инвариантности по отношению к определённым классам преобразований исходных данных.

В результате всех построений, возникает разветвлённая иерархия решающих правил, алгоритмических моделей и математических моделей различных типов. Таким образом, концептуальная модель (обобщённая схема) математической обработки ТТГ представляет собою иерархию, на нижнем уровне которой находятся структурные элементы анализируемых временных рядов (события); последовательное восхождение по иерархии — это процесс последовательной идентификации моделей различных типов; а на верхнем уровне иерархии находится финальное решающее правило, выражающее собою конечный результат работы системы распознавания. В то же время, результаты решения промежуточных задач описывают информацию о ФС системы построения движений в виде диагностических оценок и наглядных структурных представлений.

#### Библиографический список

1. Голубев В.Л., Левин Я.И., Вейн А.М. Болезнь Паркинсона и синдром паркинсонизма. М.: МЕДпресс. 1999. 416 с.
2. Бернштейн Н.А. О построении движений. М.: Медгиз, 1947. 254 с.
3. Романов С.П., Якимовский А.Ф., Пчелин М.Г. Метод тензометрии для количественной оценки тремора // Физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 1996. т. 82. № 2. С. 118–123.
4. Дик О.Е., Романов С.П., Ноздрачев А.Д. Энергетические и фрактальные характеристики физиологического и патологического тремора руки человека // Физиология человека. 2010. т. 36. № 2. С. 92–100.
5. Дик О.Е., Ноздрачев А.Д. Нелинейная динамика произвольных колебаний руки человека при двигательной патологии // Физиология человека. 2015. том 4. № 2. с. 53–59.
6. Кобенко В.Ю. Фрактальная идентификационная шкала // Омский научный вестник. 2009. №3. С. 205–213.
7. Калуж Ю.А., Логинов В.М. Показатель Херста и его скрытые свойства, Сиб. журн. индустр. матем. 2002. т. 5. №4. С. 29–37.
8. Любушкин А.А. Фрактальный анализ временных рядов. М.: 2006.
9. Peng С.К., Havlin S., Stanley Н.Е. Goldberger А.Л. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series // Chaos. 1995. V. 5. № 1. P. 82.
10. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир. 2005. 671 с.
11. Muzy J.F., Vachy E., Arneodo A. Multifractal formalism for fractal signals: the structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maxima method // Phys. Rev. E. 1993. V. 47. P. 875.
12. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. С. 859.
13. Айзерман М.А., Браверман Э.М., Розоноэр Л.И. Метод потенциальных функций в теории обучения машин. М.: Наука, 1970. 320 с.
14. Дюк В.А. Компьютерная психодиагностика. СПб.: Братство. 1994. 363 с.
15. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СО РАН. 1999. 270 с.
16. Николенко С.И., Кадурич А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер. 2018. 480 с.
17. Воронцов К.В. Обзор современных исследований по проблеме качества обучения алгоритмов // Таврический вестник информатики и математики. 2004.
18. Моттль В.В., Мучник И.Б. Детерминистские модели и методы распознавания образов на оси времени. I. Основные модели и разрешимость задачи распознавания // Автоматика и телемеханика. 1991. № 3. С 120–132.

УДК: 519.2:311.14

## ПОЛЯРНЫЕ ИНДЕКСЫ КАК ОЦЕНКА ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЯ РЕГИОНА

А.Л. Калабин, Е.И. Боброва

Тверской государственный технический университет  
Россия, Тверь, kalabin@tstu.tver.ru

*Аннотация.* Рассмотрена методика оценки состояния региона на основе полярных индексов на примере Тверской области. Показано, на примере экологии, что учет «отрицательных» индикаторов, может существенно менять оценку динамики развития.

*Ключевые слова:* полярные индексы, индикаторы, оценка состояния региона.

## POLAR INDEXES AS THE EVALUATION OF THE DYNAMIC STATUS OF THE REGION

A.L. Kalabin, Ev.I. Bobrova

Tver State Technical University  
Tver, Russia, kalabin@tstu.tver.ru

*Abstract.* The proposed method of assessing the status of the region based on polar indexes on the example of Tver region. Shown on the example of ecology that the inclusion of "negative" indicators can significantly change the evaluation of dynamics of region's development

*Keywords* polar indexes, indicators, assessment of the status of the region.

При исследовании сложных социально-экономических явлений необходима количественная оценка, как объективная основа принятия управленческих решений. Количественные оценки социально-экономических явлений с одной стороны объективны, так как основываются на эмпирических данных и корректны по методике, но вместе с тем носят, в определенной мере, формальный характер, так как отражают не реальное, а модельное состояние системы.

Индексный метод [1-4] обеспечивает возможность анализа изменения изучаемого явления (индивидуальный индекс) или группы явлений (групповой индекс) за какой-либо период времени и позволяет выявить степень участия изменения отдельных факторов в образовании общего изменения. В современной социологии и экономике для анализа применяются индексы – комплексные показатели, достаточно полно и объективно характеризующие процессы [1-3].

Одним из признаков сложных систем является их неоднородность. Попытка отследить положительное и отрицательное влияние составляющих на общее явление, в математическом смысле, была описана в [3]. Сравнивая разностный и индексный методы факторного анализа, рассматривалось два случая функциональной зависимости: прямой и обратной. При расчете структурного влияния каждого подразделения на общую совокупность в случае прямой функциональной связи предлагается добиваться одинакового знака в обоих сомножителях, при обратной связи – необходимо стремиться к противоположным знакам. Отметим, что при учете факторов с обратной функциональной зависимостью увеличивается общее число индикаторов, а их система становится более полной для описания состояния объекта.

Для учета влияния разнородных факторов предлагается использовать инструмент «полярные индексы» [4]. В предлагаемой методике под неоднородностью будем понимать, что рост каждого из индикаторов неоднозначно обуславливает увеличение значения функции свертки и наоборот – уменьшение индикатора не всегда ведет к убыванию функции свертки. Для ряда систем среди их показателей возможно выделить две группы, которые условно определим, как положительные и отрицательные факторы. К положительным факторам отнесем те, из роста индикаторов  $i_+$ , которых следует увеличение значения функции свертки. Отрицательные факторы – это когда связь

значений их индикаторов  $i$ - и величины функции свертки обратно пропорциональная. Назовем такие неоднородные индикаторы  $i_+$  и  $i_-$  разнонаправленными Тип факторных систем, содержащих разнонаправленные индикаторы, назовем полярной функцией свертки. Можно предложить два вида агрегирования индикаторов качества неоднородных систем.

Введем полярный индекс [4] как аддитивную свертку, определяемую по формулам (1)-(2):

$$\text{Знаковый индекс } I_1 = 1 + \sum_{k=1}^n S_k u_k (i_k - 1) \quad (1)$$

$$\text{Степенной индекс } I_2 = \prod_{k=1}^n i_k^{u_k S_k} \quad (2)$$

$$i_k = \frac{P_k}{P_{0k}}, \text{ где } P_k - \text{ текущее значение показателя и } P_{0k} - \text{ базовое значение}$$

показателя; степень  $S_k = \pm 1$ ; где  $S = 1$  при прямо пропорциональной зависимости изменения  $P_k$  и индекса; и  $S = -1$  при обратно пропорциональной зависимости изменения  $P_k$  и индекса;  $n$  – число индикаторов;  $u_k$  - весовые множители удовлетворяют условиям: 1) все  $u_k > 0$  и 2)  $\sum_{k=1}^n u_k = 1$ ; все  $u_k = \frac{1}{n}$ .

Для оценки работоспособности соотношений для свертки рассмотрим основные варианты возможных изменения индикаторов и его расчет в табл. 1. Варианты: А – все индикаторы равны 1, поэтому верный индекс 1; В - все индикаторы, как положительные, так и отрицательные, увеличились в два раза, верный индекс 1; С – аналогично варианту В, только наоборот - уменьшение положительных индикаторов компенсируется увеличением отрицательных, верный индекс 1; D – положительные индикаторы увеличились в два раза, а отрицательные уменьшились в два раза, поэтому верный индекс 2; Е - аналогично варианту D, только наоборот - уменьшение положительных индикаторы и увеличение отрицательных в два раза дает верный индекс 0,5. Таким образом, на частном примере показано, что использование степенного индекса (2) во всех рассмотренных случаях дает качественно и количественно верный результат (ячейки табл. 1 выделены), тогда как знаковый индекс верно отражает только качественные изменения.

Таблица 1. Тестирование индексов

Индексы	А	В	С	D	Е
Обычный (ошибка)	1				
Знаковый (ошибка)	1	1	1	1,75	0,25
Степенной (верно)	1	1	1	2	0,5

Рассмотрим возможность применения полярных индексов для оценки развития региона на примере Тверской области. Неоднородность показателей социально-экономического состояния региона заключается в том, что большая группа индикаторов, например – «**Валовой региональный продукт**» являются положительными факторами, но также существуют не учитываемые ранее и отрицательные, например – «**Численность населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума**». Рост последнего фактора отрицательно характеризует состояние региона. В настоящей работе используются 61 индикатор за 2013 и 2014 год, опубликованные на сайте tverstat.ru и доступные для общего использования. В работе не приводится полный набор данных из-за их большого объёма.

Согласно методике ООН и Всемирного банка концепции ООН для оценки устойчивого развития и эффективность используемых средств, разобьем индикаторы на 3 системы (4-ю систему – институциональную – рассматривать не будем в связи с отсутствием для нее официальной статистики):

- экономическая - 9 индикаторов; 2 отрицательных;
- экологическая – 15 индикаторов; 8 отрицательных;
- социальная – 27 индикаторов; 3 отрицательных.

Вычислим индексы, обычный и полярные индексы с добавлением «отрицательных» индикаторов, для оценки динамики развития региона и для каждой системы в отдельности табл. 2. Разбиение на системы позволяет более точно проанализировать, у какой из них происходит ухудшение или улучшение состояния. Так, состояние социальной и экономической систем немного ухудшилось в 2014 году, что показывают все 3 вида индексов. Состояние экологической системы, по полярным индексам, тоже немного ухудшилось по сравнению с предыдущим годом из-за учета отрицательных факторов.

Данные табл. 2 противоречивы, так для региона обычный индекс больше 1 т.е. в 2014 году показатели улучшились по сравнению с 2013 годом, а полярные индексы показывают ухудшение ситуации в области. Проведем анализ по выделенным системам. Для иллюстрации предлагаемой методики рассмотрим только – экологическую систему, содержащую 15 индикаторов экологической системы, из них 8 отрицательных факторов. Рост обычного индекса обусловлен увеличением индекса экологической системы на 30%, если учитывать только положительные факторы. Так «уловлено и обезврежено загрязняющих веществ»  $i_6=1,503$  и «уловленных утилизированных»  $i_5=1,912$  выросло соответственно в 1,5 и почти 2 раза.

Однако полярные индексы показывают ухудшение ситуации в области, особенно степенной индекс. Это объясняется учетом 8 отрицательных факторов в экологической системе, которые не были учтены при вычислении обычного индекса. Имеет место рост в 1,5 раза таких отрицательных факторов «Поступило на очистные сооружения»  $i_4=1459$  и «Количество источников загрязнения»  $i_{15}=1,975$ .

Таблица 2 Индексы развития Тверского региона за 2013 - 2014 года

Индекс	Обычный	Знаковый	Степенной
Общий	1,030	0,990	0,982
Экономическая система	0,965	0,966	0,945
Экологическая система	1,301	0,997	0,989
Социальная система	0,991	0,993	0,989

Ранжирование изменений индикаторов позволяет выявить показатели, требующие первоочередного управленческого воздействия. В рассмотренном случае особого внимания требует экологическая система региона. Таблица показывает, что максимальное ухудшающее влияние на индекс имеет индикатор «Количество источников загрязнения», который является наиболее влиятельным в общем списке индикаторов.

Определена зависимость величины ранжированного изменения индикаторов от их ранга (рис. 1). Следует отметить, что диапазон изменения всех 61 индикатора составляет 1,8. Этот диапазон значительно уменьшается до 0,4 при исключении 16 индикаторов с максимальным по модулю изменением из всего списка 61. Отсюда следует, что величина индекса в основном определяется 16-ью индикаторами, которые максимально изменяются по модулю, т.к. остальные 45 индикаторов изменяются не значительно, т.е. близки к единице.

Для управления все показатели можно разделить на две группы. К первой группе отнесем показатели, величина которых непосредственно изменяется при

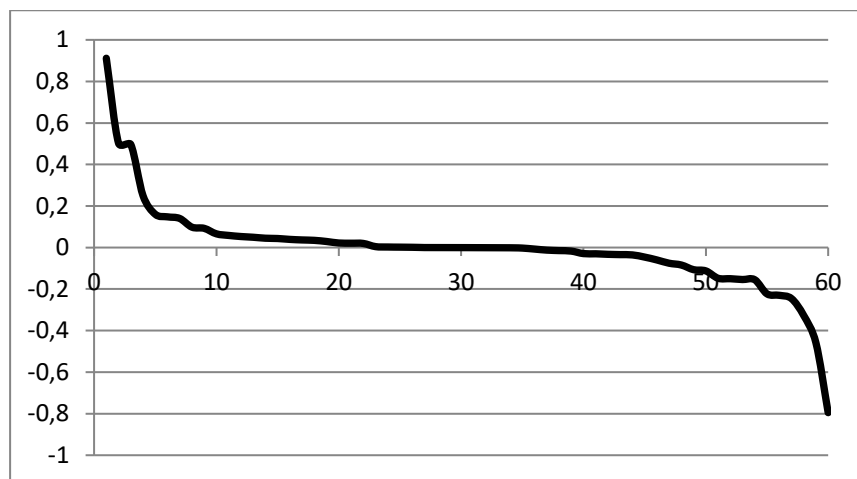


Рис. 1. Зависимость величины изменения индикатора от ранга

управляющем воздействии на систему, например, выделением материальных или иных ресурсов. В нашем случае к таким относятся, например, число утилизированных, уловленных и обезвреженных отходов. Вторая группа – это показатели, которые отражают состояние системы, но управление, которыми непосредственно невозможно принципиально.

Разбиение показателей на группы позволяет определить, на которые можно повлиять на административные и материальные ресурсы. Выбор основных показателей для управляющего воздействия должны проводить эксперты, на основе минимизации затрат. Так, например, одним из критериев выбора величин для управления может является минимизация стоимости условной единицы изменения индикатора.

Показано, что использование полярных индексов для анализа динамики состояния регионов позволяет увеличивать количество индикаторов в силу их разнонаправленности и величина оценки может существенно изменяться при этом. Однако при увеличении релевантности выборки, возрастает точность оценки.

#### Библиографический список

1. Казинец Л.С. Теория индексов. М.: Госстатиздат. 1963.
2. Кевеш П. Теория индексов и практика экономического анализа. М.: Финансы и статистика. 1990.
3. Шицман С.Е. Индексный или разностный метод факторного анализа // Вестник статистики. 1990. № 10.
4. Борисова Е.В., Калабин А.Л. Учет влияния разнородных факторов в индексном анализе // Вопросы статистики. 2003. № 11. С. 75-78.

УДК 004.415.2+ 81.322.2

## **ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТОВ**

**А.Л. Калабин, А.В. Туляков**

*Тверской государственной технической университет  
Россия, Тверь, kalabin@tstu.tver.ru*

*Аннотация.* Разработано программное средство для автоматизированного анализа и преобразования текстовых данных с использованием методов Text Mining. Программа представляет приложение с графическим интерфейсом, реализующее набор методов Text Mining и способное применить эти методы к входным текстовым данным. Предложены методы предварительной обработки, кластеризации, классификация, латентно-семантического анализа, автоматического аннотирования и некоторые другие. Реализованные в программном средстве методы имеют гибкую настройку с помощью параметров предложенных пользователю. Работоспособность программной системы анализа текстов подтверждается результатами тестирования на представленной выборке документов, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* Программа, анализ данных, Text Mining, анализ текста

## **A SOFTWARE SYSTEM FOR TEXT ANALYSIS**

**A.L. Kalabin, A.V. Tulyakov**

*Tver State Technical University  
Tver, Russia, kalabin@tstu.tver.ru*

*Abstract.* There is developed a software tool, which is used for automatically text analysis and processing text data using Text Mining methods. The program is a Desktop application that has an intuitive graphical interface. It realizes the set of Text Mining methods, that can be applied to input text data. There are proposed methods: classification, clusterization, LSA, automatical annotation, etc. The methods used, can be flexible configured with proposed parameters. The performance of a text analysis software is confirmed by test on input sample data, which are in good agreement with the experimental data.

*Keywords:* Desktop application, data analysis, Text mining, text analysis.

Основной объём научной информации представлен в форме текста и это простой и изученный тип данных для передачи информации между людьми. Количество текстовой информации растёт экспоненциально, но ее слабая структурированность затрудняет использование алгоритмов Data Mining. Анализ неструктурированных текстов является предметом Text Mining. Отметим актуальность этих исследований для научной литературы.

Основная функция разработанной программной системы TextStageProcessor – реализация методов Text Mining, с возможностью поэтапной настройки процесса быстрого анализа и обработки текстовых документов.

Программное обеспечение разработано с помощью языка Python и библиотек ruMorphy2, Qt-5, Scikit-Learn, NumPy, Pandas и представляет desktop-приложение. Модель данных приложения, пользовательский интерфейс и взаимодействие с пользователем разделены на три отдельных компонента для того, чтобы модификация одного из компонентов оказывала минимальное воздействие на остальные. Протестировано на операционных системах: Windows 7,8,10 и Debian Linux.

Реализованы методы Text Mining [1,2]

1. Классификация - 4 алгоритма.
2. Кластеризация - 4 алгоритма.
3. Выделение ключевых понятий и термов
4. Логический анализ и применение правил вывода

5. Автоматическое аннотирование
6. Латентно-семантический анализ
7. Вычисление критериев для выделения термов
8. Предварительная обработка текстовых документов
9. Экспорт результатов в csv-файл.

В качестве данных для тестирования организованы 3 группы массивов текстовых данных:

- 1) Пример Китай (5 документов) для отладки из литературы [1].
- 2) Статьи о PC: CPU, RAM, MB, HDD, SSD (91 документ из <http://www.ferra.ru/>)

Для предварительной обработки текстов в рассматриваемой программе реализованы этапы:

- многоступенчатая настраиваемая фильтрация;
- морфологический анализ (Нормальная форма слова) с использованием библиотеки ruMorphu2;
- удаление стоп слов из внешнего списка;
- настраиваемое отсечение по TD-IDF, IDF.

Большое количество терминов (признаков) документов в задаче анализа текстов приводит к ряду проблем. Поэтому стремятся сократить число терминов из полного множества так, чтобы новое (редуцированное) множество терминов содержало наиболее информативные в некотором смысле термины [1, 2]. Для выделения таких актуальных термов реализованы следующие критерии:

- Документная частота (DF)
- Информационная выгода (MI)
- Критерий взаимной информации (IG)
- Критерий Хи-Квадрат (CHI)

Теоретически предполагается, что тематика документа определяется его словарным запасом, а тематическая близость термов характеризуется тем, насколько часто эти термы используются в документах одной и той же тематики. Это определяется латентно-семантическим анализом (LSA) [3]. Он позволяет выявить скрытые семантические связи между документами или частями одного документа и оценить степень схожести тематики документа. Результаты выводятся в визуальной форме (рис. 1) и в файлах формата .CSV.

Алгоритмы классификации с учителем сортируют полнотекстовые документы по заранее известным категориям (классам). В роли учителя выступает выборка документов, для которых заранее известна принадлежность определенной категории, называемая обучающим множеством [1, 2]. Реализовано 4 алгоритма классификации

- 1) k-ближайших соседей k-Nearest Neighbor
- 2) Роккио Rocchio
- 3) "наивной" байесовской классификации Naive Bayes
- 4) наименьших квадратов Learning Label-Specific Features

Алгоритмы кластеризации (классификации без учителя) анализируют коллекцию полнотекстовых документов с целью разбиения их на группы так, чтобы внутри одной группы оказывались документы наиболее родственные в некотором смысле, а различные документы попадали в различные группы. В общем случае алгоритм кластеризации – должен самостоятельно принимать решения о количестве и составе кластеров, групп родственных документов. Для этого используются понятия расстояний между документами в фазовом пространстве термов [1, 2].

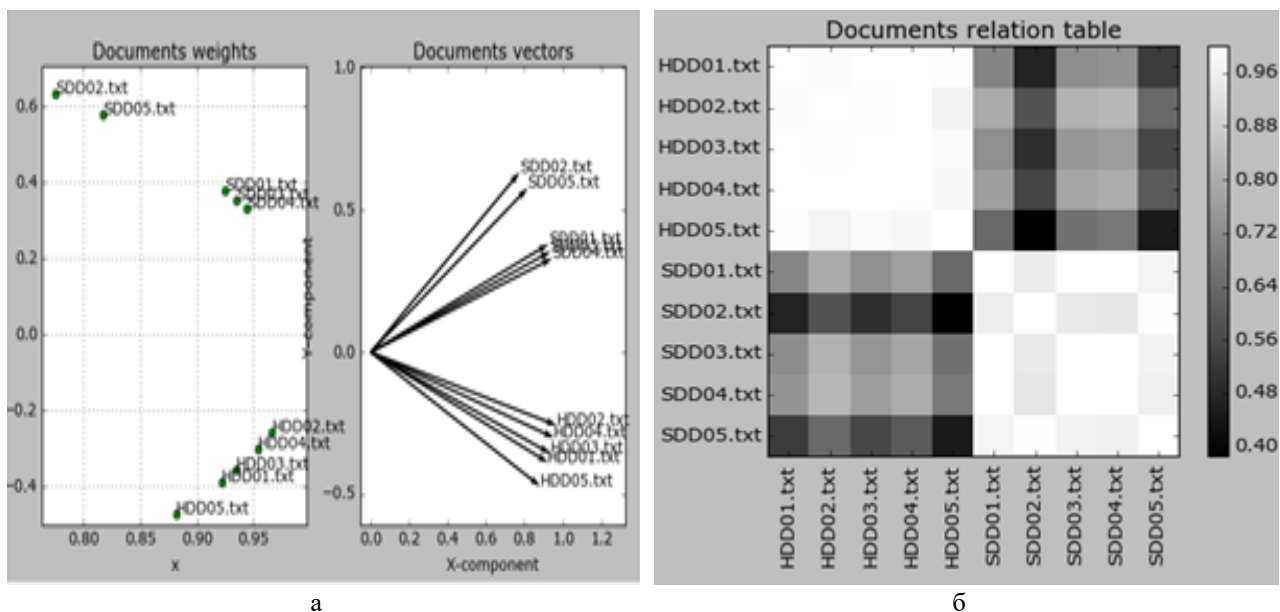


Рис. 1. Скриншоты результатов ЛСА на примере статей о HDD, SSD; а- векторное представление документов; б – визуализация таблицы отношений документов.

Реализовано 4 алгоритма кластеризации 4 алгоритма

- 1) Иерархический восходящий
- 2) Алгоритм k-средних K-Means
- 3) Нечёткий алгоритм с-средних C-Means
- 4) Плотностный алгоритм DBScan

Результаты работы алгоритмов выводятся в файлах формата .CSV (рис. 2)

Наивный Байес	Classification	Real	Result
CPU14.txt [['CPU', -7795.907], ['HDD', -8568.636]]	CPU	CPU	True
CPU20.txt [['CPU', -3121.659], ['HDD', -3484.627]]	CPU	CPU	True
CPU18.txt [['CPU', -4778.516], ['HDD', -5306.774]]	CPU	CPU	True
HDD14.txt [['CPU', -4009.425], ['HDD', -3604.09]]	HDD	HDD	True
HDD15.txt [['CPU', -2951.062], ['HDD', -2777.61]]	HDD	HDD	True
HDD16.txt [['CPU', -4247.341], ['HDD', -3967.59]]	HDD	HDD	True
HDD13.txt [['CPU', -4291.278], ['HDD', -3852.354]]	HDD	HDD	True

а

	HDD		CPU		Result
	True	False	True	False	
Real	16	0	20	0	True
Hierarchical	16	0	20	0	True
KMiddle	16	0	20	0	True
SMiddle	16	0	20	0	True

б

Рис. 2. Скриншоты результатов классификации (а) и кластеризация (б) на примере статей о HDD, CPU

Работоспособность разработанной программной системы анализа текстов подтверждается результатами тестирования на приведенной выше выборке документов, которые удовлетворительно согласуются с исходными данными [1]. В перспективе планируется модифицировать данную разработку в элемент экспертной системы и применять для Web mining.

На разработанной программной системы проведена экспериментальная оценка методов классификации на близких по категориями выборках документов с описанием HDD и SSD. Результаты работы алгоритмов оцениваются по таким критериям как ошибка (E), правильность (A), точность (P) и полнота (R) [1], а также, предлагаемая нами, суммарная величина точности, полноты и правильности ( $I = P + R + A$ ), которая должна иметь максимальное значение 3, при 100% правильности работы метода.

Метод	NB	LLSF	Rocchio	kNN
P+R+A	2,9	2,7	2,7	2,8

Эксперименты показали, что  $\{NB\} > \{kNN\} > \{LLSF, Rocchio\}$ ; здесь « > » означает «эффективнее», где NB — наивный байесовский метод классификации, kNN

— метод k-ближайшего соседа, LLSF — метод наименьших квадратов, Rocchio — метод Роккио.

Проект расположен в веб-сервисе для хостинга IT-проектов и их совместной разработке по адресу: <https://github.com/mhyhre/TextStageProcessor>. Предлагаем использовать наше приложение в Вашей работе.

#### Библиографический список

1. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика : учеб. пособие / Большакова Е.И., Клышинский Э.С., Ландэ Д.В., Носков А.А., Пескова О.В., Ягунова Е.В. М.: МИЭМ. 2011. 272 с. ISBN 978-5-94506-294-8.
2. Барсегян А. А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод, М. Д. Тесс, С. И. Елизаров. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург. 2009. 512 с.
3. Ландэ Д.В. Поиск знаний в Internet. Профессиональная работа. Пер с англ. М. : Издательский дом “Вильям. 2005. 272 с.

## ОЦЕНКА СВЯЗАННОСТИ ТЕКСТА МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ЛИНГВИСТИКИ

**А.Л. Калабин**

*Тверской государственной технической университет  
Россия, Тверь, kalabin@tstu.tver.ru*

*Аннотация.* Предложена оценка связанности текста методами компьютерной лингвистики и Text Mining – кластеризации (5 разных алгоритмов) и латентно-семантического анализа. Определение связанности текста заключается в разбиении целого текста на части с их последующей кластеризацией и анализе состава кластеров, состоящих из последовательных или случайных частей исследуемого текста. Рассмотрены 4 примера применения к 3-м текстам двух разных методов. Получены согласованные результаты для всех примеров: сильно, частично и слабо связанный текст.

*Ключевые слова:* связанность текста, Text Mining, кластеризация, латентно-семантического анализ

## A SOFTWARE SYSTEM FOR TEXT ANALYSIS

**A.L. Kalabin**

*Tver State Technical University  
Tver, Russia, kalabin@tstu.tver.ru*

*Abstract.* An assessment of the coherence of the text by methods of computational linguistics and Text Mining – clustering (5 different algorithms) and latent semantic analysis. The definition of text connectedness consists in the division of the whole text into parts with their subsequent clustering and analysis of the clusters consisting of the following or random parts of the text under study. 4 examples of application of two different methods to 3 texts are considered. Consistent results are obtained for all examples: strongly, partially, and weakly related text.

*Keywords:* text connectivity, Text Mining, clustering, latent semantic analysis

Рост объём научной информации, представленной в форме текста, растёт экспоненциально. Однако ее качество определяется ее структурированностью. Текст должен быть последовательным, логическим, связанным и цельным.

Понятия связанности и цельности текста определяются через свойства когерентность и когезия – исключительно лингвистические элементы, обеспечивающие связность текста [1]. Однако нет проверенных объективных методов измерения этих свойств.

Нами предлагается следующий подход оценки связанности текста, основанный на использовании методов компьютерной лингвистики. При этом обратим внимание что термин компьютерная лингвистика, используемый в литературоведения имеет второе название Text Mining, который используется в компьютерных и информационных технологиях. Одним из предлагаемых методов Text Mining или компьютерной лингвистики является кластеризация [2]. Кластеризация заключается в том, что определенный набор данных в нашем случае это набор текстов пытаются определить насколько они связаны. Другой метод латентно-семантического анализа (ЛСА / LSA) [3].

Для проведения экспериментов использовалась разработанная на кафедре ПО ТвГТУ программная системы анализа текстов, которая проверена на работоспособность и включает методы кластеризации и ЛСА. Проект расположен в веб-сервисе для хостинга IT-проектов по адресу: <https://github.com/mhyhre/TextStageProcessor>.

Использование кластеризации заключается в разбиении целого текста на части с их последующей разбиения на кластеры. Пусть текст рассказа состоит из нескольких частей. Каждую из частей представлена в виде отдельного текстового файла.

Определяем, как эти отдельные части связаны между собой с помощью методов кластеризации. Предлагаем, что если текст связан, то будут определены кластеры состоящий из последовательных частей исследуемого текста. Пример - допустим есть пять частей текста, то в первый кластер должно входить, например, (1 2 3) или (1 2) части этого текста и во второй кластер (4 5) или (3 4 5) части этого текста.

$$(1\ 2\ 3\ 4\ 5) = (1\ 2\ 3) + (4\ 5) = (1\ 2) + (3\ 4\ 5)$$

Пример не связанности частей текста для пяти частей текста, может быть если в первый кластер входит, например, (1,3,5) или (2,4) части этого текста и во второй кластер (2,4) или (1,3,5) части этого текста.

$$(1\ 2\ 3\ 4\ 5) \langle \rangle (1,3,5) + (2,4)$$

Реализовано 5 алгоритмов кластеризации:

- 5) Иерархический восходящий
- 6) Алгоритм k-средних K-Means
- 7) Нечёткий алгоритм c-средних C-Means
- 8) Плотностный алгоритм DBSCAN
- 9) Спектральная алгоритм

Рассмотрим пример 1 - текст рассказа Ф.М. Достоевского «Сон смешного человека».

Сон смешного человека			
Метод	Результат		
	Кластер 0:	Кластер 1:	Кластер 2:
DBSCAN	Сон с ч 11.txt	Сон с ч_13.txt	Сон с ч 14.txt
Hierarchical clustering	Сон с ч 12.txt		Сон с ч 15.txt
SMiddle	Сон с ч 11.txt	Сон с ч 13.txt	
Spectral clustering	Сон с ч 12.txt	Сон с ч 14.txt	
K-Means	Сон с ч 15.txt		

Первые 2 метода показывают полную связанность текста, т.к. в 0-кластер входит (1,2) в 1-кластер (3) и в 2-кластер (4,5) части этого текста. Части расположены строго последовательно. Следующие 3 метода (выделены в таблице) показывают частичную связанность текста, т.к. в 0-кластер входит (1,2) и 5 в 1-кластер (3,4) части этого текста. Части расположены не последовательно – (1,2,5).

Первые 3 метода показывают полную связанность текста, т.к. в 0-кластер входят все части (1-6) этого текста. Части расположены строго последовательно. Следующие 2 метода (выделены в таблице) показывают частичную связанность текста, т.к. в 0-кластер входит (1,2,3,6) и в 1-кластер (4,5) части этого текста. Части расположены не последовательно – (1,2,3,6).

Пример 2 – текст повести Ф.М. Достоевского «Хозяйка», состоящий из 6 частей.

Латентно-семантический анализ позволяет выявлять латентные связи изучаемых явлений или объектов, что является немаловажным критерием при моделировании

процессов понимания и мышления [3]. Результаты ЛСА наиболее близки к результатам кластеризации, однако пространства и координаты объектов выстраиваются с помощью иных алгоритмов. В качестве исходной информации для ЛСА мы будем использовать матрицу слова-на-документы – части анализируемого текста.

ХОЗЯЙКА		
Метод	результат	
	Кластер 0:	Кластер 1:
DBSCAN	ХОЗЯЙКА_11.txt	
Hierarchical clustering	ХОЗЯЙКА_12.txt	
	ХОЗЯЙКА_13.txt	
	ХОЗЯЙКА_14.txt	
	ХОЗЯЙКА_15.txt	
	ХОЗЯЙКА_16.txt	
K-Means	ХОЗЯЙКА_11.txt	ХОЗЯЙКА_14.txt
Spectral clustering	ХОЗЯЙКА_12.txt	ХОЗЯЙКА_15.txt
	ХОЗЯЙКА_13.txt	
	<i>ХОЗЯЙКА_16.txt</i>	
SMiddle	ХОЗЯЙКА_11.txt	ХОЗЯЙКА_13.txt
	ХОЗЯЙКА_12.txt	ХОЗЯЙКА_14.txt
	<i>ХОЗЯЙКА_16.txt</i>	ХОЗЯЙКА_15.txt

В основе ЛСА содержится стандартная математическая операция матричного разложения – сингулярное разложение (singular value decomposition). Сингулярное разложение – это разложение прямоугольной вещественной или комплексной матрицы, имеющее широкое применение, в силу наглядной геометрической интерпретации, при решении многих прикладных задач. Не являясь алгоритмом кластеризации, ЛСА получаем больше новых данных – 2D вектора.

Пример 3 – текст рассказа Ф.М. Достоевского «Сон смешного человека».

Можно отметить, что на векторной зависимости частей текста и карте семантической связанности и выделяется квадрат с документами 1,2,3 и отдельно 4,5. Предыдущие алгоритмы также выделяли эти документы в отдельный класс. В векторном отображении можно заметить, что файлы 4,5 достаточно сильно отличаются как от 1,2,3, так и между собой. Высокая семантическая близость между 1,2 и 3 частью 4 и 5 частями и меньшая семантическая близость между 1 и 4; 2 и 5 частями.

Причем, ЛСА показывает для примера 1 высокую семантическую близость между 1 и 3 частью и меньшую семантическую близость между 3 и 4 частью.

Пример 4 – текст повести Ф.М. Достоевского «Хозяйка» рассмотрим в сравнении с примером 1 и примером 3 - текст повести Л.Н. Толстого «Отец Сергей». Можно отметить, что на векторной зависимости (рис. 3.) частей текста и на карте семантической связанности (рис. 4.) явно выделяется квадрат с документами: (*Хозяйка*) = (1,3,6) и отдельно 2,5; (*Отец Сергей*) = (1, 3, 6), (2, 7, 4, 8) и отдельно 5. Предыдущие алгоритмы также выделяли эти документы в отдельный класс.

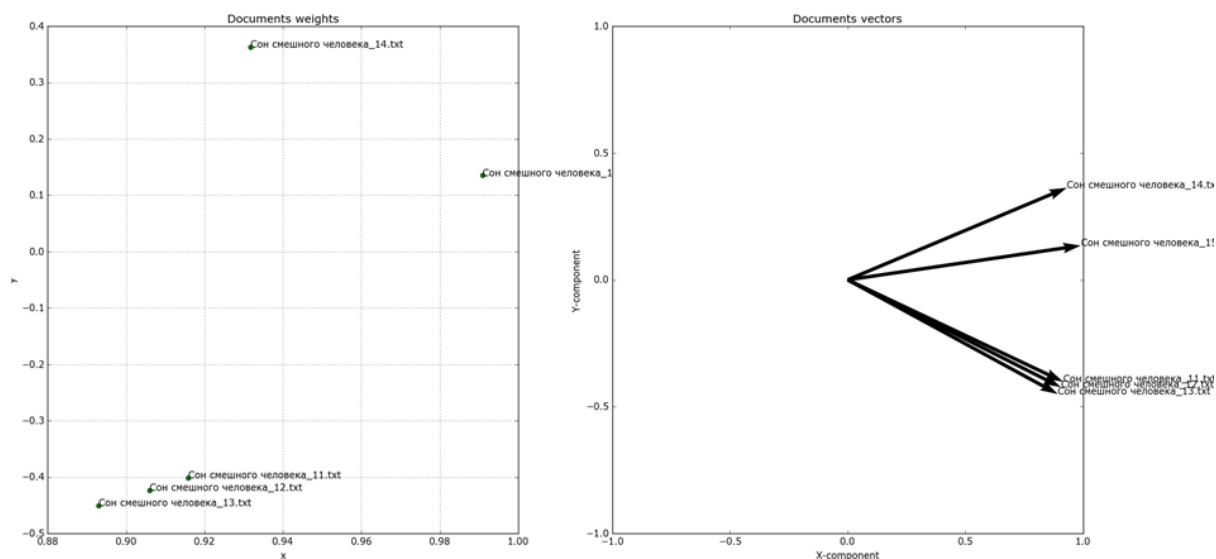


Рис. 1. Векторная зависимость частей текста в ЛСА

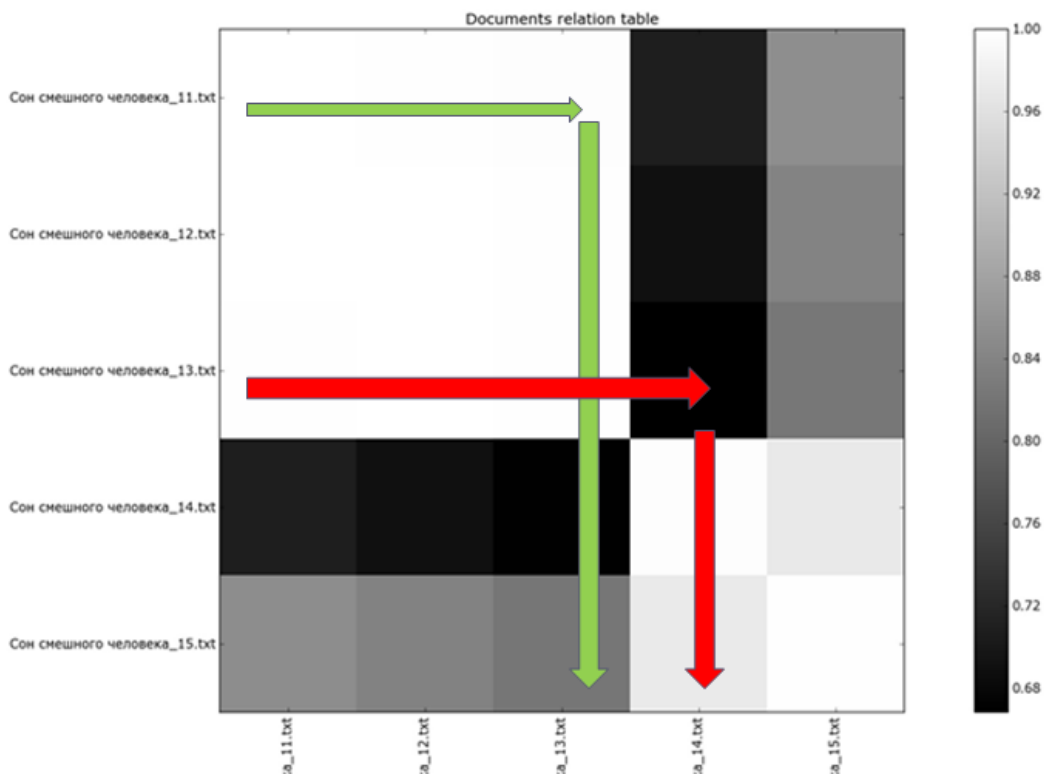


Рис. 2. Карта семантической связанности частей текста в ЛСА

Предложена оценка связанности текста методами компьютерной лингвистики – кластеризации (5 алгоритмов) и латентно-семантического анализа. Рассмотрены 4 примера применения к 3-м текстам. Двумя разными методами получены согласованные результаты для 1-го и 2-го примера. Текст рассказа Ф.М. Достоевского «Сон смешного человека» сильно связан, текст повести Ф.М. Достоевского «Хозяйка» частично связан, текст повести Л.Н. Толстого «Отец Сергей» слабо связан. Подход планируется применить к анализу научной и технической литературы.

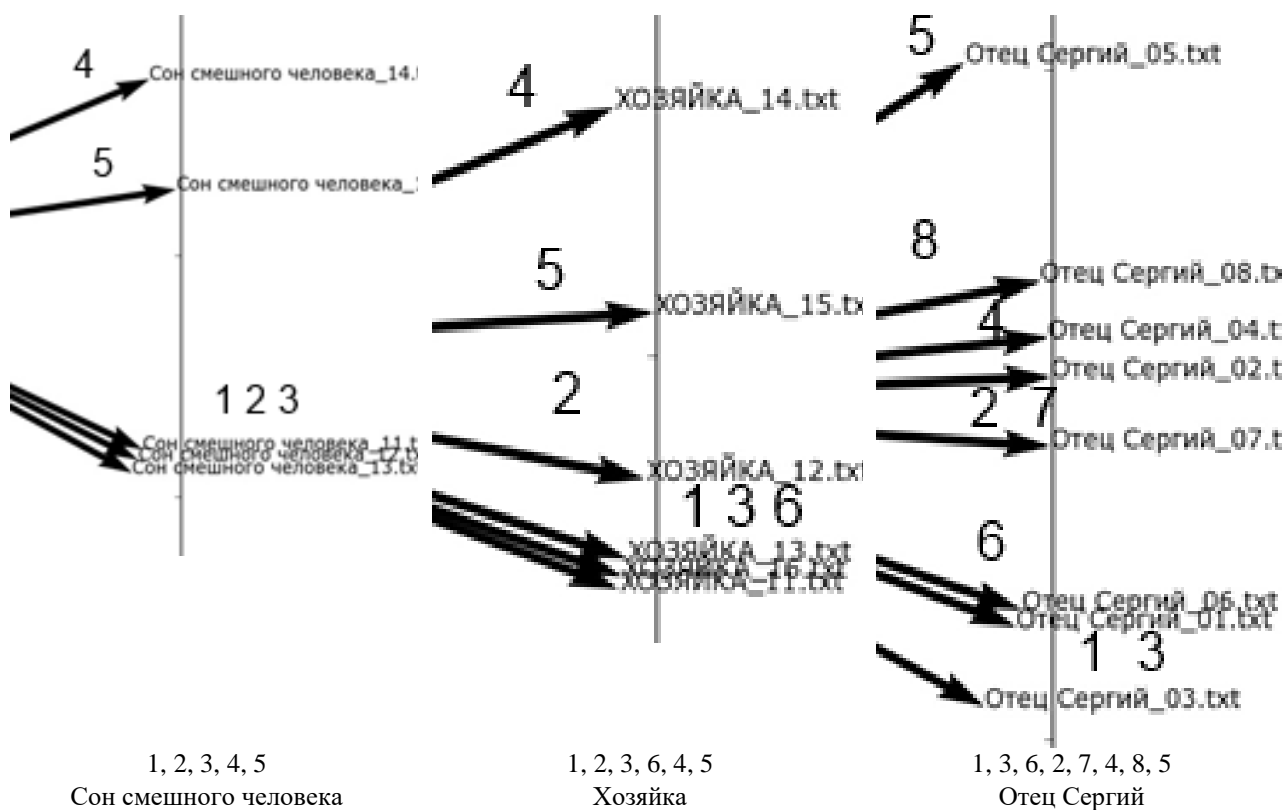


Рис. 3. Сравнительная векторная зависимость частей текста в ЛСА

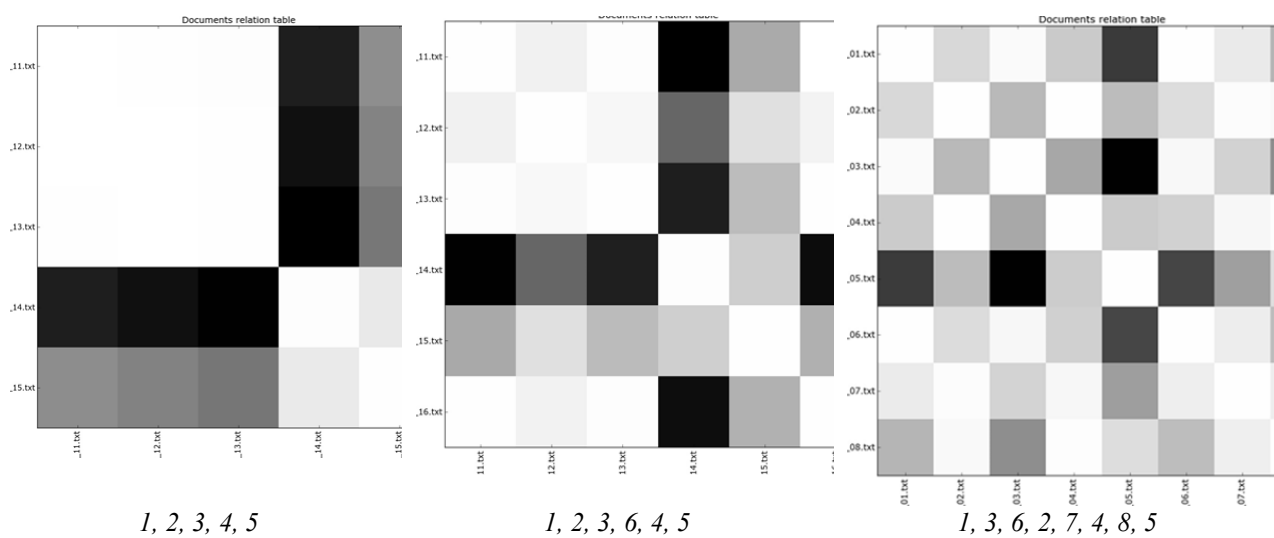


Рис.4. Сравнительная карта семантической связанности частей текста в ЛСА

### Библиографический список

1. Сорокин Ю. А. Текст: цельность, связность, эмотивность // Аспекты общей и частной лингвистической теории текста. М. 1982. с. 61 - 73.
2. Барсегян А. А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод, М. Д. Тесс, С. И. Елизаров. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург. 2009. 512 с.
3. Ландэ Д.В. Поиск знаний в Internet. Профессиональная работа / Пер с англ. М. : Издательский дом "Вильямс. 2005. 272 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ КОГНИТИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНИКА

**А.А. Федосеев**

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Россия, Москва, a.a.fedoseyev@gmail.com*

*Аннотация.* Предложена технология когнитивного электронного учебника, обеспечивающая полное усвоение учебного материала всеми учащимися. Технология состоит из технологии создания когнитивного учебника, технологии учебного процесса и логистики. Рассмотрен пример создания нормированного урока для когнитивного учебника.

*Ключевые слова:* электронное и смешанное обучение, электронный учебник, предъявление и усвоение учебного материала, комплект заданий, S+S технология, блокчейн.

### COGNITIVE E-TUTOR TECHNOLOGY

**A.A. Fedoseev**

*Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences  
Russia, Moscow, a.a.fedoseyev@gmail.com*

*Abstract.* The technology of the cognitive e-tutor is offered, which ensures the complete assimilation of the educational material by all students. The technology consists of the technology of the cognitive e-tutor creating, the technology of the educational process and logistics. An example of creating a normalized lesson for a cognitive e-tutor is considered.

*Keywords:* electronic and blended learning, electronic tutor, educational material presentation and assimilation, task kit, S+S technology, blockchain.

С развитием информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) постепенно сформировалась ситуация, при которой традиционное отсутствие в системе общеобразовательной школы этапа обучения, может быть исправлено. Как известно [1], школа только доводит до сведения учащихся новый учебный материал и периодически выборочно контролирует его усвоение. Процесс усвоения, что должен обеспечивать этап обучения, в большинстве случаев оказывается за пределами внимания школы, поскольку он является индивидуальным и неопределенным по количеству циклов повторения. Если этот процесс и реализуется для некоторых учащихся, то только силами родителей или других родственников учащихся, а также частными усилиями репетиторов (в т.ч. и выступающими в этой роли учителями).

Большинство информационных ресурсов учебного назначения создаются для поддержания существующего в школе учебного процесса и не позволяют поддерживать этап обучения. Однако, при наличии желания такая поддержка может быть осуществлена. Одним из примеров практической реализации этой задачи является опыт академии Хана (<https://www.khanacademy.org/>), в процедурах учебного процесса которой предусмотрена возможность задержки учащихся на изучении каждого урока до тех пор, пока все относящиеся к нему задания не будут выполнены.

Современные средства информационно-коммуникационных технологий, поддерживающими мультимедийность и интерактивность, позволяют повторить успех Академии Хана на новом уровне при соблюдении некоторой технологии. Предлагаемая технология базируется на использовании специального информационного ресурса, названного когнитивным электронным учебником, т.к. он поддерживает процесс усвоения учебного материала каждого урока каждым учеником по предмету. По причинам, представленным ниже, термин учебник пришлось перевести для этого случая на английский язык как tutor (репетитор), а не традиционным textbook (книга текстов).

Технология когнитивного учебника состоит из трех частей: технология создания учебника, технология учебного процесса с использованием когнитивного учебника и логистика. Рассмотрим эти части.

Когнитивный электронный учебник состоит из стандартной оболочки, нормированных уроков и электронного обучения. Стандартная оболочка предназначена для размещения учебного материала урока и заданий к нему. Она должна обеспечивать мультимедийное содержание и интерактивность содержания урока и заданий. Нормированный урок это самостоятельный, логически завершённый элемент когнитивного электронного учебника, представляющий собой электронный ресурс с учебным материалом, подлежащий усвоению за один прием. Содержит изложение материала, ограниченное по количеству элементов знания, подлежащих усвоению, а также комплект заданий, обеспечивающий их усвоение. К элементам знания могут относиться понятия и связи между ними.

Причины ограничения количества элементов знания, предъявляемых учащимся в одной электронной сессии, а также необходимый объём соответствующих этим элементам заданий подробно изложен в [2]. Человек может удерживать во внимании одновременно всего несколько элементов. Для целей образования предельное количество этих элементов рекомендуется не превышать пяти. При этом если количество изучаемых элементов менее трех, то не удастся сконцентрировать внимание учащихся, относящихся к такому уроку, как к пустому и не заслуживающему внимания. Таким образом, число элементов находится в пределах от трех до пяти [3]. Какие это элементы? Каждый элемент нового знания должен быть неделимым, единичным. Если при изложении материала используются элементы уже усвоенного знания, то они могут быть сколь угодно сложными. Например, «бином Ньютона», «закон Ома». Или даже «динамика», «электричество» – соответственно тому, как усвоенное знание укладывается в памяти.

Например, нормированный урок, посвященный закону Ома, содержит пять элементов. Это три известных элемента: напряжение, сопротивление и ток, новый элемент, представляющий связь между ними и собственно являющийся законом Ома, и известный комплексный элемент из другого предмета «алгебраические преобразования». Чтобы в памяти сформировались элементы «динамика», «электричество» или «алгебраические преобразования», каждому из них должен быть посвящен нормированный урок с соответствующим названием, состоящий из трех – пяти элементов. Таким образом, автору когнитивного учебника следует внимательно следить за количеством элементов урока, подлежащих усвоению, и ограничивать излагаемую тему предложенными пределами. Здесь следует отметить, что указанное ограничение нужно еще и потому, что при большем количестве элементов в уроке стремительно возрастает количество необходимых заданий. Переходим к понятию комплект заданий.

Комплект заданий представляет необходимое для гарантированного усвоения порции учебного материала количество различных по качеству заданий, касающихся всех подлежащих усвоению аспектов материала. Таким образом, заданий необходимо иметь столько и таких типов, сколько и каких типов достаточно для убедительной демонстрации усвоенного знания. Так, необходимы концептуальные задания на понимание каждого нового элемента. Далее, необходимы задания на зависимости между новыми элементами, а также между новыми и уже усвоенными элементами. Если имеется необходимость, то должны быть задания на зависимости между тремя элементами, при том, что каждый из элементов поочередно является параметром. Возвращаясь к примеру с законом Ома, получим следующий состав комплекта заданий: Во-первых, это концептуальные вопросы на понимание каждого нового понятия. Новое понятие – одно. Во-вторых, вопросы на понимание взаимодействия каждой пары величин в рамках изучаемого закона. Таких пар

три. В-третьих, задания на вычисление каждой величины, при известных двух других. Их также три. В-четвертых, построение графиков изменений каждой величины, в зависимости от изменений двух других. Таких графиков может быть шесть, если одна из независимых величин является аргументом, а вторая – параметром. Итого, в примере комплект заданий состоит минимум из четырех типов заданий общим количеством 13. Меньше 13 заданий нельзя: не все аспекты задаваемых уроком знаний будут проверены. Больше 13 заданий вполне может быть. Например, чтобы проверить усвоение новых понятий может потребоваться более одного концептуального вопроса на понимание. Задачи на вычисления могут быть сформулированы, что называется, «в лоб», могут иметь завуалированную структуру с тем, чтобы учащийся догадался, как решить задачу. Таким образом, типизация заданий определяет только нижнюю границу для количества заданий в комплекте. Количество необходимых заданий для обеспечения полного усвоения материала – еще один довод в пользу ограничения элементов знания, подлежащего усвоению за один прием. При увеличении элементов учебного материала стремительно возрастает размер необходимого комплекта заданий, т.к. необходимо проверять понимание взаимодействия каждого с каждым.

Вышеизложенное приводит нас к следующей технологии создания когнитивного электронного учебника. Первое: разработка структуры предмета, таким образом, чтобы каждый урок был логически завершенным и содержал от трех до пяти элементов, подлежащих усвоению. Второе: присваивание каждому уроку смыслового названия с тем, чтобы использовать его в качестве элемента учебного материала других уроков при необходимости. Поэтому недопустимыми являются такие названия уроков, как, например, «Продолжение предыдущего урока» или «Параграф 14». Третье: разработка комплекта заданий к каждому уроку.

Содержащаяся в когнитивном электронном учебнике система электронного обучения представляет набор процедур, обеспечивающих циклическое, в случае невыполнения комплекта заданий, предъявление учебного материала нормированного урока с последующим предъявлением к выполнению комплекта заданий. Процедуры обеспечивают: оценивание выполнения заданий, фиксацию усвоенного урока, возврат учащегося к изучению части урока, задания по которой оказались невыполненными (для этого случая желательно иметь более детальное и подробное изложение учебного материала), предъявление измененного комплекта заданий, своевременное оповещение учителя о состоянии с усвоением материала учащимися для смешанного обучения.

Использование когнитивного учебника требует особой технологии учебного процесса, которая заключается в следующем. Основой технологии является несколько видоизмененный перевернутый урок [4], при котором восприятие нового учебного материала, а также его усвоение с помощью выполнения комплекта заданий осуществляется во внеучебное время. Учитель своевременно получает информацию о состоянии дел с усвоением материала очередного урока с тем, чтобы спланировать следующий урок, на котором необходимо провести индивидуальную работу с теми учащимися, которым не удалось справиться с комплектом заданий. К материалам следующего урока каждый учащийся допускается после усвоения предыдущего материала и выполнения комплекта заданий.

Логистика когнитивного электронного учебника также состоит из трех частей, представляющих собой доставку учебника, информационную поддержку учебного процесса и внесение корректировок на основании предложений учителей и накопленной статистики. Чтобы доставить учебник и обеспечить им учащихся наиболее простым способом является разместить его облачно и обеспечить доступ

учащимся школ, заключивших договор с провайдером. Однако, что касается России, все еще остается много школ, не имеющих достаточно мощных каналов связи для обеспечения ежедневной работой всех учащихся в системе когнитивных электронных учебников. Поэтому наряду с облачным расположением учебников придется воспользоваться технологией S+S, при которой основной объем данных в виде мультимедийного и интерактивного контента когнитивных электронных учебников будет находиться на компьютерах учащихся, а сравнительно небольшая информация, относящаяся к управлению обучением, будет путешествовать по каналам связи. К этой информации относятся такие данные, как идентификация учащегося, в том числе, как ученика определенного класса определенной школы, номер страницы учебника, посещенной во время последней сессии, итоги выполнения заданий и некоторые другие служебные данные.

Предполагается, что учащийся может работать с когнитивным электронным учебником на компьютере, имеющим выход в интернет, если заранее позаботился о том, чтобы на этом компьютере размещен соответствующий контент. Защищенный контент становится работоспособным только под управлением облачной системы, после идентификации учащегося.

Наиболее в настоящее время приемлемой для обеспечения функционирования системы когнитивных электронных учебников является распределенная сеть по технологии Blockchain [5]. Эта технология защищена от несанкционированного доступа. Она позволяет накапливать и использовать данные о усвоенных учащимися уроках и предметах. Данные сохраняются при переходе учащегося из одной школы в другую. Каждая школа или локальный департамент образования могут иметь узлы сети Blockchain. Естественно, требуется некий координатор, подключающий и отключающий школы, обеспечивающий доступ учащимся и учителям, а также выдающий сертификаты или иные документы по завершении обучения.

По мере того, как учащиеся выполняют комплекты заданий данные об этом попадают в узлы Blockchain-сети. Накопленные данные используются для допуска учащихся к материалам следующих уроков, для выдачи соответствующих справок и сертификатов и для совершенствования когнитивных электронных учебников на основе анализа статистики. В случае перехода учащегося в другую школу, соответствующий код системы передается администрацией в новую школу, после чего администрация новой школы может ознакомиться с достижениями учащегося и спроектировать для него траекторию дальнейшего обучения.

Предложенная технология при реализации повысит успеваемость учащихся, а также упростит учебный процесс, т.к. сделает ненужными различные контрольные мероприятия.

#### Библиографический список

1. Писарев В.Е., Писарева Т.Е. Теория педагогики. Воронеж: «КВАРТА». 2009. 611 с.
2. Федосеев А.А. К вопросу об уменьшении объема порций учебного материала при электронном обучении // Информатика и ее применения. 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 105-110.
3. Петрова В. Метод 3-4-5, чтобы все запоминать! Освойте новую технологию запоминания // Montreal: Accent Graphics Communications. 2014. 169 с.
4. Bergmann J., Sams A. Flip Your Classroom: Reach Every Student in Every Class Every Day / ISTE ISTD. 2012.
5. Богданова Д.А. Блокчейн и образование // Дистанционное и виртуальное обучение. 2017. № 2. С. 65–74.

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА НАГЛЯДНОСТИ ОБУЧЕНИЯ В МАТЕМАТИКЕ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

**А.В. Капусто, Е.А. Крушевский, А.А. Кузнецова, М.А. Хотомцева**

*Белорусский национальный технический университет, Беларусь, Минск, vm3\_ftk@bntu.by*

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы реализации принципа наглядности обучения по дисциплине «Математика» для студентов инженерных специальностей. Широкое сочетание вычислительных средств и продуманного теоретического обоснования решения математической задачи является неизбежным требованием времени. Предложены и описаны некоторые варианты таких внедрений.

*Ключевые слова:* наглядность обучения, компьютерные системы, эффективность обучения.

## **TEACHING VISIBILITY PRINCIPLE IMPLEMENTATION IN MATHEMATICS VIA MODERN MEANS OF TRANSFER OF INFORMATION**

**A.V. Kapusto, E.A. Krushevski, A.A. Kuznetsova, M.A. Khotomtseva**

*Belarusian National Technical University, Belarus, Minsk, vm3\_ftk@bntu.by*

*Abstract.* Teaching visibility principle implementation in discipline "Mathematics" for engineering students are considered. The widespread combination of computational tools and thoughtful theoretical foundation for solving mathematical problem is the inevitable requirement of the time. Some variants of such implementations are proposed and described.

*Keywords:* teaching visualization, computer systems, learning efficiency.

Принцип наглядности в обучении позволяет решить следующие важные задачи: помочь обучаемому получить наиболее полное представление о форме объекта или сущности явления, выявить структуру и установить внутренние и внешние связи. По характеру отражения действительности различают следующие виды наглядности: натуральная наглядность, представляющая настоящие предметы или процессы; изобразительная наглядность, позволяющая заменить демонстрацию реального предмета его определенной копией (фото, картина, рисунок); символическая наглядность, представляющая изображение свойств и характерных черт объекта исследования с помощью определенных символьных средств (схема, диаграмма, таблица, рисунок, график). Именно символьные средства играют большую роль при обучении математике, а с развитием ПО, распространением и широкой доступностью различного рода гаджетов, их роль в обучении математическим дисциплинам стремительно возрастает.

«Фактически объективно созданы предпосылки для того, чтобы разумная, научно обоснованная компьютеризация образовательного процесса в условиях многоуровневой структуры образования стала одним из существенных активизирующих факторов обучения. При этом в преподавании математики возникает возможность задействовать и использовать резервы визуализации информации, поднять на новый уровень, качественно обновить и улучшить процесс усвоения материала, формирования мировоззрения и профессионального кругозора, развития у будущих специалистов творческих способностей и навыков самостоятельного получения и применения знаний. Вместе с тем студент приобретает дополнительную возможность получения самостоятельного выбора источников информации, навыков экономии времени и т.п. Преподаватель, использующий информационные технологии (ИТ), в частности, программное обеспечение (ПО), приобретает эффективные средства рационализации и оптимизации труда при проектировании педагогических проектов, усиления параметров их наглядности и доступности» [1].

Использование ПО позволяет организовать процесс изучения математики на технических специальностях с первого занятия так, что все расчеты вместо студента

будет выполнять компьютер: от вычисления определителя, решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и построения обратной матрицы, до вычисления интеграла и получения решения дифференциального уравнения.

Заметим, что использование компьютера в решении СЛАУ и ряда других задач из раздела линейной алгебры позволяет получать результат в считанные секунды (рис. 1), что освобождает время для обсуждения постановки задач прикладного содержания, анализа найденных значений.

```

1-01.nb
In[2]:= A =  $\begin{pmatrix} 2 & 3 & -1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 3 & 4 & -3 \end{pmatrix}$ ; B =  $\begin{pmatrix} 4 \\ 5 \\ 2 \end{pmatrix}$ ; LinearSolve[A, B]
Out[2]= {{-15}, {11}, {-1}}

In[15]:= Inverse[A] // MatrixForm
Out[15]/MatrixForm=
 $\begin{pmatrix} -14 & 5 & 8 \\ 9 & -3 & -5 \\ -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ 

In[16]:= % . B
Out[16]= {{-15}, {11}, {-1}}

```

Рис. 1. Решение СЛАУ в КС Wolfram Mathematica

В теме дифференцирование функции одной переменной имеет смысл изложить на доске вычисление производной сложной функции  $y = \cos^2 x \cdot \cos(\sin^2 x)$  в аналитической форме и сопроводить его вычислением в компьютерных систем (КС) (рис. 2), для проверки результата [2].

```

2_01_2.nb *
In[13]:= y2 = (Cos[x]) ^2 (Cos[(Sin[x]) ^2]);
          D[y2, x] // Simplify
Out[14]= -2 Cos[x] Sin[x] (Cos[Sin[x]^2] + Cos[x]^2 Sin[Sin[x]^2])

```

Рис. 2. Дифференцирование в КС Wolfram Mathematica

При изучении темы «Построение графиков функций» КС нет альтернативы. Классические методы построения не позволяют построить более пяти-шести графиков за одно занятие. В КС на каждый график тратится не более 10 минут, причем попутно можно получить решение всех необходимых экстремальных задач (рис. 3) [2].

Особую наглядность приобретают решенные в компьютерных пакетах задачи по аналитической и дифференциальной геометрии. Например, лекция и практическое занятие «Поверхности второго порядка» включают большое количество графиков, которые удобно представлять выполненными в математических пакетах *Mathematica*, *Matlab*, *Mathcad*, *Maple* и др. Графические возможности указанных пакетов позволяют показать сечения поверхностей координатными плоскостями, что увеличивает осознанное восприятие поверхностей и влияет на понимание изучаемого материала.

«Преподаватель имеет возможность вращать геометрические объекты, объясняя студентам их характерные особенности в каждом отдельном случае... Выбранные математические пакеты целесообразно использовать при построении сечений, что особенно важно, так как именно эта часть учебного материала вызывает у студентов сильные затруднения в процессе изучения представленной темы» [3].

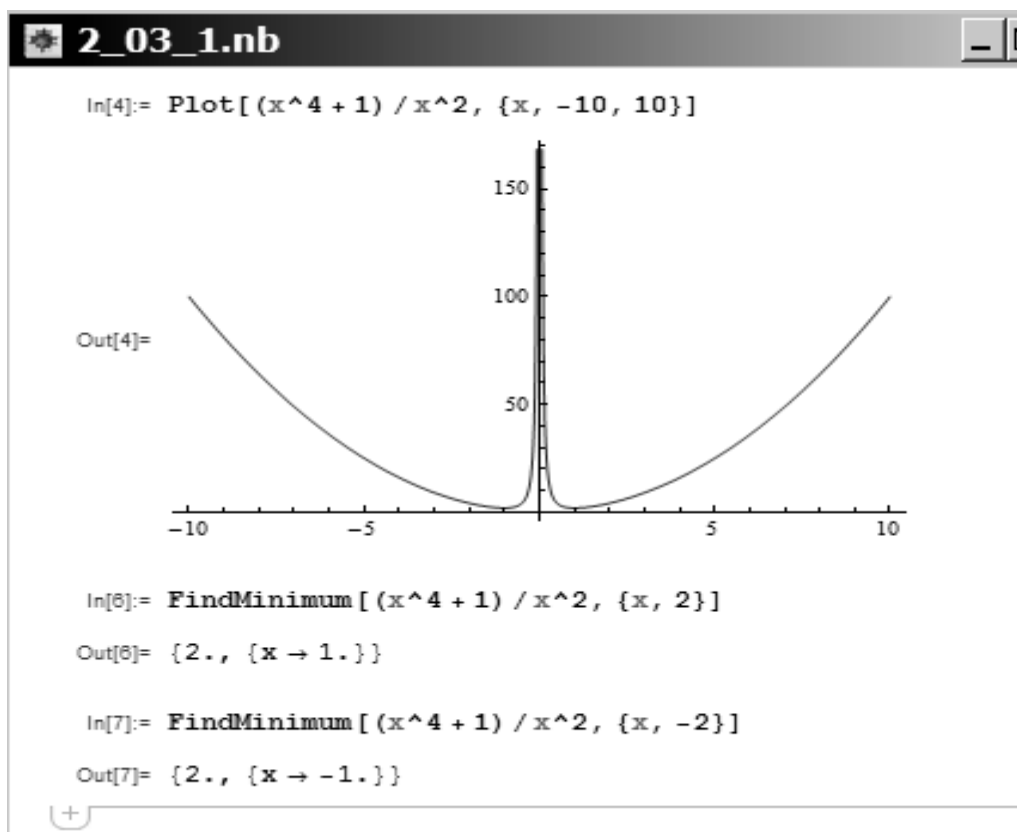


Рис. 3. Построение графика функции в КС Wolfram Mathematica

Задача о нахождении центра кривизны и построении соприкасающейся окружности при изложении только на доске требует значительного времени и явно не достигнет поставленной цели. Только малая часть студентов сможет понять суть вопроса. Использование КС успешно решает такие задачи (рис. 4) [2] и дает возможность для самостоятельной работы студентов на основе введенных шаблонов.

Наглядность в изложении тем «Функциональные ряды» (Тейлора, Фурье) также стала возможной благодаря КС (рис. 5, 6).

Вместе с тем отметим, что следует выбирать грамотное сочетание всех форм изложения материала. В противном случае познавательная деятельность студента будет сведена к уровню пользователя ПО и будет состоять только в правильном вводе информации. Это уведет студентов от понимания полученного результата, повлечет неумение анализировать ход решения (а именно составление алгоритма решения) и полученный результат, а также возможности изменения в ходе решения отдельных параметров или условий задачи, неспособность прогнозировать возможные варианты решения и т.п.

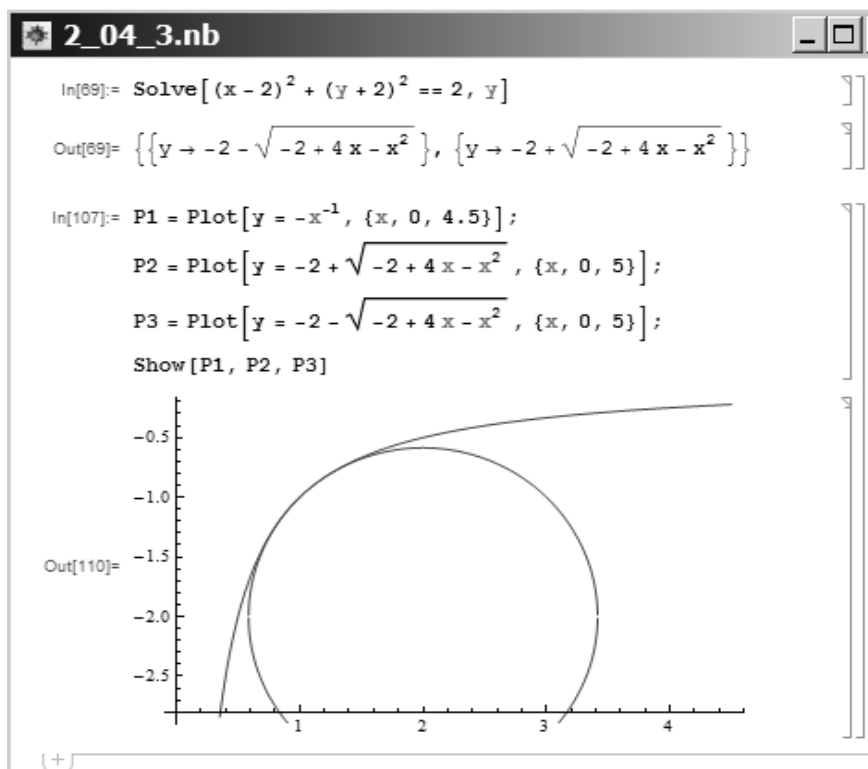


Рис. 4. Построение соприкасающейся окружности в КС Wolfram Mathematica

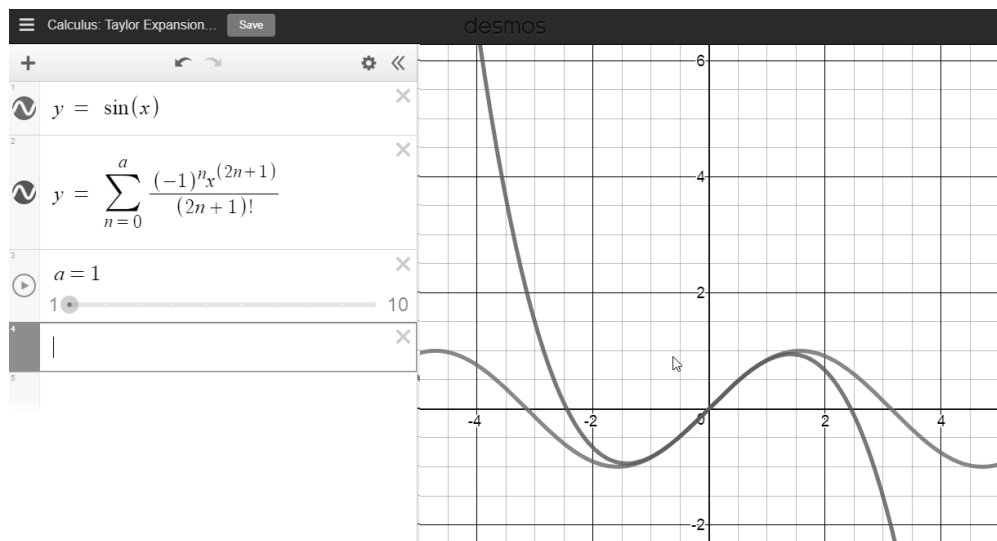


Рис. 5. Частичная сумма ряда Тейлора в КС Desmos

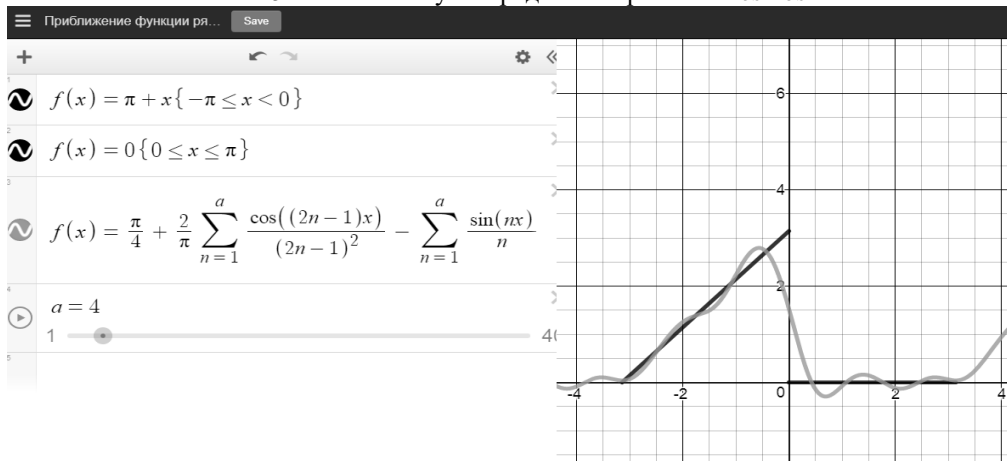


Рис. 6. Частичная сумма ряда Фурье в КС Desmos

Поэтому важно правильно ориентировать студентов на привлечение ПО к процессу решения задач. Взвешенное и осмысленное использование при этом математических пакетов должно научить, с течением времени, студентов рассматривать ПО как вспомогательный инструмент при выполнении расчетных заданий и средство самоконтроля вычислений. Особое внимание следует обратить на соблюдении корректности вычислений с учетом погрешностей [4].

Таким образом, непосредственное привлечение ПО и ИТ в совокупности с современными средствами передачи и обработки информации позволит на определенных этапах обучения математическим дисциплинам:

- ориентировать студентов на более всестороннее восприятие материала;
- акцентировать внимание на наиболее значимые положения исследования объекта;
- наглядно продемонстрировать процесс решения задачи от ее постановки до анализа полученных результатов.

### Библиографический список

1. Вакульчик В.С., Капусто А.В. К методике применения приложения Microsoft Excel для построения алгебраических и трансцендентных линий // Вестник ПГУ. Педагогические науки. 2014. № 7. С. 33 – 40.
2. Крушевский Е.А., Кузнецова А.А. Математика. Практикум по курсу «Математика. 1-й семестр» для студентов-заочников специальности 1-56 02 01 «Геодезия». Минск: БНТУ. 2018. 58 с.
3. Вакульчик В.С., Капусто А.В. Использование программного обеспечения – важная составная компонента обновления содержания и технологий при обучении математике студентов нематематических специальностей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Е. 2010. № 11. С. 93 – 98.
4. Крушевский Е.А., Хотомцева М.А. Вычислительная математика: пособие для студентов специальностей 1-70 01 01 "Производство строительных изделий и конструкций", 1-70 02 01 "Промышленное и гражданское строительство", 1-70 02 02 "Экспертиза и управление недвижимостью", 1-70 03 01 "Автомобильные дороги", 1-70 03 02 "Мосты, транспортные тоннели и метрополитены", 1-70 04 01 "Водохозяйственное строительство", 1-70 04 02 "Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна", 1-70 04 03 "Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов", 1-70 07 01 "Строительство тепловых и атомных электростанций". Минск: БНТУ. 2018. 67 с.

## ОПТИМАЛЬНАЯ ТОНОВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ МОНОХРОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДВУХЭТАПНЫМ ГИБРИДНЫМ АЛГОРИТМОМ

А.Г. Агаджанян

*Донской государственной технической университет  
Россия, Ростов-на-Дону, foralbert92@gmail.com*

*Аннотация.* Исследование посвящено тоновой аппроксимации применительно к монохромным мультитоновым изображениям. Тоновая аппроксимация заключается в сокращении размера яркостной палитры изображения и реализуется заменой оригинальных тонов на аппроксимирующие. Основной задачей является подбор адекватных аппроксимирующих тонов, т.е. нахождение оптимальной структуры аппроксимирующей палитры. Для обеспечения оптимальной тоновой аппроксимации в коллективных работах автора разработан и экспериментально исследован гибридный алгоритм, который заключается в двухэтапной обработке изображения. На первом этапе используется модифицированный эволюционно-генетический алгоритм, целью которого является сокращение области поиска оптимальной аппроксимирующей палитры. На втором этапе используется простой, но эффективный алгоритм перебора ближайшей окрестности субоптимального решения, найденной на первом этапе, позволяющий гарантированно получить экстремальную аппроксимирующую палитру согласно критерию оптимизации. Текущее исследование посвящено сравнению предложенного подхода с известным алгоритмом кластеризации  $k$ -средних, который является популярным решением рассматриваемой задачи. Экспериментально исследование продемонстрировало однозначное преимущество гибридного алгоритма в сравнении с модифицированным алгоритмом  $k$ -средних как с позиции временного ресурса, так и с позиции точности решения.

*Ключевые слова:* тоновая аппроксимация, гибридный алгоритм, алгоритм  $k$ -средних, оптимизация, аппроксимация, эволюционно-генетический алгоритм, монохромные изображения

## OPTIMAL TONE APPROXIMATION OF MONOCHROME IMAGES BY TWO-STAGE HYBRID ALGORITHM

A.G. Aghajanyan

*Don state technical university  
Rostov-on-Don, Russia, foralbert92@gmail.com*

*Abstract.* The paper considers the actual problem of monochrome images tone approximation. The tone approximation consists in reduction of image's palette size and implemented by replacing the original tones on approximating ones. The main problem of the procedure is selection the appropriate approximating tones for image, in other words, the problem of finding optimal approximating palette. To provide optimal tone approximation in author's cooperative investigations the hybrid algorithm was developed. The hybrid algorithm implies a two-stage processing of the image. In the first stage the modified evolutionary-genetic algorithm is used. The main goal of the first stage is reducing the search area of optimal approximating palette. In the second stage used the simple, but effective deterministic algorithm of checking the nearest neighborhood of suboptimal solution that found by the first stage. This stage allow to guarantee the extreme approximating palette according to optimization criterion. The research is aimed to compare the hybrid algorithm with well-known clustering  $k$ -means algorithm, which is popular tool for tone approximation. The experimental investigation showed advantage of the hybrid algorithm comparing to the modified  $k$ -means algorithm according to computational time and accuracy of solution.

*Keywords:* tone approximation, hybrid algorithm,  $k$ -means algorithm, optimization, approximation, evolutionary-genetic algorithm, monochrome images

**Введение.** Тоновая аппроксимация изображений представляет понижение количества тонов (цветов), участвующих в воспроизведении изображения. Процедура реализуется заменой оригинальных тонов, принимающих значения исходной палитры (ИП), на наиболее близкие аппроксимирующие тона, входящие в аппроксимирующую палитру (АП), размерность которой строго меньше ИП. Таким образом, каждый тон АП заменяет определенное множество исходных тонов из ИП, что, несомненно, приводит к потере визуального качества отображения.

Проблема тоновой аппроксимации в исследованиях авторов рассматривается применительно к монохромным мультитоновым изображениям (ММИ). Палитра ММИ представляет 256 тонов одного цвета, где 0 – черный, а 255 – белый. Актуальность тоновой аппроксимации ММИ преимущественно вызвано востребованностью изображений типа ММИ в технических задачах, в которых может быть использована процедура тоновой аппроксимации. Например, к таким задачам можно отнести распознавание образов [1-4], сжатие [5, 6], художественная обработка, шифрование и т.д. [6].

На качество тоновой аппроксимации, кроме размера АП, влияет также и ее структура, т.е. входящие в АП тона. Корректный подбор структуры АП позволяет повысить качество аппроксимированного изображения в условиях неизменности размера АП. Рассмотрим пример тоновой аппроксимации изображения, используя одинаковые по размеру АП, но отличные по структуре (см. рис. 1).



Оригинал

8-тоновая АП (а)

8-тоновая АП (б)

Рис. 1. Оригинальное ММИ и аппроксимированное до 8 тоновой палитры различными АП (а, б).

На представленной иллюстрации видно, что 8-тоновая АП (б) за счет более адекватной тоновой структуры, аппроксимирующей оригинальное изображение, позволила уменьшить степень визуальной погрешности при реализации процедуры. Таким образом, возникает задача оптимизации процедуры тоновой аппроксимации, заключающейся в корректном подборе структуры АП.

Для оценки качества тоновой аппроксимации и ее оптимизации необходим объективный числовой критерий. В цифровом виде растровое изображение представляется в виде матрицы, что позволяет использовать в качестве критерия суммарное поэлементное отклонение идентичных ячеек матрицы (пикселей) между оригинальным и аппроксимированным изображениями. В большинстве работ, посвященных этой задаче, используется среднее квадратичное отклонение (СКО) [7, 8], но в рамках исследования [9] не удалось выявить однозначного преимущества критерия СКО по сравнению со средним модулем отклонения (СМО) применительно к тоновой аппроксимации ММИ. Поскольку СМО требует меньшего времени вычисления, это стало основанием использования именно этого критерия:

$$\Delta t = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^n \left( \sum_{l=1}^m \left| \left( t_k^a \right)_{ij} - \left( t_l^o \right)_{ij} \right| \right), \quad (1)$$

где  $N = n * m$  – общее количество пикселей (элементов матрицы) изображения,  $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца, а  $k$  и  $l$  индексы аппроксимированного  $t^a$  и оригинального  $t^o$  тона в яркостном пространстве цвета.

Рассмотрим описанный ранее пример (см. рис. 1), оперируя объективной оценкой, вычисляемой согласно выбранному критерию (1). Так, для 8-тоновой АП (а) среднее отклонение по всему изображению составило 5,79 тоновых единиц, тогда как

для 8-тоновой АП (б) 4,72. Таким образом, корректный подбор структуры АП позволил понизить погрешность визуального отображения на 18,4%.

**Тоновая аппроксимация ММИ алгоритмом  $k$ -средних.** Одним из наиболее популярных методов реализации тоновой аппроксимации является алгоритм кластеризации  $k$ -средних, что связано с простотой реализации и хорошим уровнем качества выходного результата [7, 8]. На вход алгоритму подаются  $k$  начальных точек (центроидов), ориентируясь на которые формируются первичные  $k$  кластеры наиболее близких к центроидам точек во множестве, где  $k$  равно размеру АП, а множеством являются пиксели изображения. Далее вычисляются центры-масс сформированных кластеров, которые в итоге назначаются новыми центроидами. Этот процесс повторяется итеративно до тех пор, пока внутрикластерное расстояние изменяется. Таким образом, алгоритм стремится сократить отклонение точек кластеров от своих центроидов. Финальные центроиды и представляют конечную структуру АП.

Алгоритм  $k$ -средних является детерминированным и имеет зависимость от выбора стартовых центроидов, что и является основным его недостатком. Одним из эффективных подходов к решению является обработка алгоритмом некоторого набора стартовых центроидов [3], что также подтверждено начальными исследованиями автора.

В связи с этим предложены модификации алгоритма  $k$ -средних, предполагающая последовательную обработку 50, 500 и 5000 случайно сгенерированных АП, получившие соответствующие названия «ПСК50», «ПСК500» и «ПСК5000». Это позволит оценить эффективность алгоритма, а также характер изменения времени и точности с увеличением количества обрабатываемых АП. Случайная генерация каждого начального центроида (тона) АП происходит в диапазонах, определенных равномерным сечением яркостной шкалы ИП на заданное количество участков, что позволяет избежать заведомо плохих решений.

**Гибридная модель оптимальной тоновой аппроксимации ММИ.** В коллективных работах автора [9-14] предложена, разработана и экспериментально исследована гибридная модель оптимальной (ГМО) тоновой аппроксимации ММИ, заключающийся в последовательном использовании эвристического и детерминированного подхода, где первый нацелен на сокращение области поиска, а второй на гарантированное обеспечение экстремального выходного результата.

На эвристическом этапе ГМО задействуется модифицированный эволюционно-генетический алгоритм тоновой аппроксимации ММИ. Этот алгоритм разработан и экспериментально исследован в работах [9-11], где продемонстрирована его эффективность как инструмента субоптимизации процедуры тоновой аппроксимации ММИ. На детерминированном этапе используется алгоритм гарантированного нахождения экстремума, основанный на переборе ближайшей окрестности структуры АП, найденной на первом этапе. Механизм детерминированного алгоритма подробно описан в работе [12], а эффективность ГМО показано в исследованиях [13, 14].

Следует отметить, что ГМО позволяет обеспечить биооптимизацию процедуры тоновой аппроксимации, т.е. сделать показатель точности и времени оптимальными относительно друг друга. Это достигается за счет того, что точность решения выходит из рассмотрения, поскольку гибридный алгоритм гарантированно обеспечивает экстремальный выходной результат.

**Постановка задачи.** Провести экспериментальное исследование, нацеленное на сравнительный анализ эффективности гибридной модели оптимизации относительно модифицированного алгоритма  $k$ -средних.

**Экспериментальное исследование.** План сравнительного исследования предполагает обработку 30 ММИ, различающихся по следующим основным параметрам: размер, частотная диаграмма яркости (следовательно и исходная палитра), а также область графической сцены. После проведения соответствующей обработки, предполагается оценка алгоритмов по двум основным критериям, а именно – среднему показателю качества тоновой аппроксимации и времени обработки. После выбора наилучшего алгоритма по двум критериям, производится оценка косвенных параметров (максимальное/минимальное улучшение и статистическая вероятность улучшения) относительно менее результативного алгоритма.

Проведенное исследование продемонстрировало преимущество ГМО над предложенными вариантами алгоритма  $k$ -средних по всем анализируемым параметрам (см. табл. 1). Было ожидаемым, что наиболее эффективным по точности решения среди различных вариантов алгоритма  $k$ -средних окажется ПСК5000. В среднем по 30 изображениям ГМО позволил уменьшить отклонение тоновой аппроксимации согласно критерию (1) в сравнении с ПСК5000 на 2,69%. При этом среднее время обработки ГМО составило 71,5 миллисекунд (мс), тогда как ПСК5000 затратил 134,4 мс (см. табл. 1, строка 6), т.е. время обработки ГМО меньше в  $\sim 1,9$  раз.

Преимущество ГМО по точности по сравнению с ПСК50 и ПСК500 примерно одинаковое и составило 4,31-4,28%. Однако, эти варианты алгоритма  $k$ -средних имеют существенное превосходство во времени обработки. Так, алгоритм ПСК50 в среднем занимает 2,23 мс на обработку и превосходит алгоритм ГМО в  $\sim 32$  раза. В свою очередь алгоритм ПСК500 уменьшает время обработки в  $\sim 5$  раз. Этот фактор делает эти алгоритмы предпочтительным для задач с малым временным ресурсом. Тем не менее необходимо отметить, что несмотря на увеличение количества обрабатываемых АП в 10 раз, ПСК500 не продемонстрировал существенное улучшение по сравнению с ПСК50, что свидетельствует о нестабильности такого подхода и высокой вероятности возможных отклонений.

Следует отметить, что отрицательное значение в параметре минимального улучшения (см. табл. 1, строка 4), свидетельствует о том, что получен результат лучше, чем ГМО. Тем не менее статистическая вероятность события, в котором ГМО превосходит результат предложенных алгоритмов  $k$ -средних составляет не меньше 93,3%. Таким образом, алгоритм ГМО в худшем случае уступил в качестве тоновой аппроксимации по критерию (1) только в 2 из тридцати обработанных изображений. Максимальное улучшение результата алгоритмом ГМО варьировалось от 15 до 28%.

Таблица 1. Результаты проведенного эксперимента

	ПСК50	ПСК500	ПСК5000	ПСК2800
ГМО в среднем лучше по критерию качества на (%)	4,31	4,28	2,69	3,65
ГМО максимально улучшил качество на (%)	27,48	28,91	15,47	27,53
ГМО минимально улучшил качество на (%)	-1,52	-0,11	-2,08	-1,15
Вероятность улучшения качества с помощью ГМО (%)	93,3	96,6	93,3	93,3
Среднее время обработки (мс)	2,23	14,16	134,43	72,97

Для полноты исследования принято решение протестировать предложенную модель  $k$ -средних, но в сопоставимых временных условиях с алгоритмом ГМО. Таким образом, предложена модель  $k$ -средних, обрабатывающая 2800 случайных АП, что в среднем требовало 72,8 мс (напомним, среднее время ГМО составляет 71,5 мс). Результаты проведенного тестирования также представлены в табл. 1.

**Заключение.** Проведенное экспериментальное исследование продемонстрировало преимущество предложенного алгоритма ГМО по качеству тоновой аппроксимации в сравнении с различными реализациями известного

алгоритма  $k$ -средних и варьировалось от 2,69% до 4,31%. В худшем случае алгоритм ГМО позволил улучшить качество тоновой аппроксимации ММИ на 2,69% при этом затрачивая в  $\sim 1.9$  раз меньше времени. В сопоставимых временных условиях за счет уменьшения количества аппроксимирующих палитр, обрабатываемых алгоритмом  $k$ -средних, преимущество ГМО составило 3,65%.

#### Библиографический список

1. Shapiro L., Stockman G. Computer Vision. Prentice Hall PTR. 2001. 609 p.
2. Kanan C., Cottrell G. Color-to-Grayscale: Does the Method Matter in Image Recognition? // PLoS One. vol. 7. 2012. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029740> (дата обращения: 13.08.2018).
3. Ramirez E., Jimenez O., Perez A., Pogrebnyak O. Grayscale Image Segmentation Based on Associative Memories // Computations in Systems. vol. 15. 2011. p. 149-162.
4. Kharinov M. Reclassification formula that provides to surpass K-means method // Computer Vision and Pattern Recognition. 2012. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.6204.pdf> (дата обращения: 13.08.2018).
5. Hu Y.-C., Chen W.-L., LO C.-C., Chuang J.-C. Improved vector quantization scheme for grayscale image compression // Opto-Electronics Review. vol. 20. 2012. p. 187-193.
6. Emre C. Improving the Performance of K-Means for Color Quantization. // Image and Vision Computing. vol. 29. 2011. p. 260-271.
7. Sangwine S., Horne R. The Colour Image Processing Handbook. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg. 1998. 425 p.
8. Brun L., Tremeau A. Digital Color Imaging Handbook. The Electrical Engineering and Applied Signal Processing Series. NYC: CRC Press. 2003. 764 p.
9. Нейдорф Р.А., Агаджанян А.Г. Исследование аспектов возможного применения субоптимальной тоновой аппроксимации изображений в задачах технического зрения средств автономной навигации // Известия ЮФУ, Технические науки. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. №1-2 (186-187). 2017. С. 133-145.
10. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Monochrome Multitone Image Approximation on Lowered Dimension Palette with Sub-optimization Method based on Genetic Algorithm // Springer, Improved Performance of Materials. Springer International Publishing: 2016. p. 144-154.
11. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Monochrome multitone image approximation with low-dimensional palette // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). 2016.
12. Нейдорф, Р.А. Оптимизация результатов аппроксимации растровых изображений и оценка их экстремальности / Р.А. Нейдорф, А.Г. Агаджанян, А.Р. Нейдорф // Математические методы в технике и технологиях. Саратов: СГТУ и Ю.А. Гагарина, 2017. Том 1. С. 19-26.
13. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. A high-speed hybrid algorithm of monochrome multitone images approximation // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). 2017.
14. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Improved Bi-optimal Hybrid Approximation Algorithm for Monochrome Multitone Image Processing // ADVCOMP 2017, The Eleventh International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences. IARIA. 2017. p. 20-25.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ AGILE И ИГРОФИКАЦИИ В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ

Е.А. Сасин\*, А.С. Сидорович\*\*

\* Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Республика Беларусь, Минск, [eugene.sasin@gmail.com](mailto:eugene.sasin@gmail.com)

\*\* Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Республика Беларусь, Минск, [a.s.sidorovich@gmail.com](mailto:a.s.sidorovich@gmail.com)

*Аннотация.* Предложены пути и варианты применения Agile в образовательной и научной деятельности. Agile – это гибкая методология управления различными проектами, которая де-факто становится стандартом в современном мире. Она во многих отраслях заменяет классический водопадный подход. Как правило, применение игрофикации синергирует с Agile, увеличивая их совместный положительный эффект. Показано, как гибкая методология и игрофикация применялись в исследовательской работе и дипломных работах студентов. Также приводятся дальнейшие планы авторов по внедрению Agile в образовательный процесс.

*Ключевые слова:* Agile, игрофикация, образование, гибкая методология, управление проектами, самообразование, образовательная траектория.

## APPLICATION OF AGILE METHODOLOGY AND PLAYING IN EDUCATION

E.A. Sasin\*, A.S. Sidarovich\*\*

\* *Belarusian state university of informatics and radioelectronics,*  
*Minsk, Republic of Belarus, [eugene.sasin@gmail.com](mailto:eugene.sasin@gmail.com)*

\*\* *Belarusian state university of informatics and radioelectronics,*  
*Minsk, Republic of Belarus, [a.s.sidorovich@gmail.com](mailto:a.s.sidorovich@gmail.com)*

*Abstract.* This article suggests ways and options for using Agile in educational and scientific activities. Agile is a flexible methodology for managing various projects that de facto become standards in the modern world. In many places it replaces the classic - waterfall - approach. Usually, the use of gamification synergizes with Agile, increasing their joint positive effect. This article shows how flexible methodology and gamification were applied in research work and undergraduate works of students. The authors' further plans for the implementation of Agile in the educational process are also given.

*Keywords:* Agile, gamification, education, flexible methodology, project management, self-education, educational trajectory.

Современное общество характеризуется высоким темпом жизни за всю историю человечества и нет предпосылок к тому, что его ускорение остановится. Мир стал гораздо сложнее, динамичнее и более непредсказуемым, чем был 25, а тем более 100 лет назад. До новейшего времени в образовании господствовала модель однократного получения образования и последующей работы на протяжении все оставшейся жизни с редкими повышениями квалификации. В реалиях современного общества такая модель становится несостоятельной и на первый план выходит модель непрерывного (итерационного) получения образования в течение всей жизни параллельно с трудовой деятельностью. Такая модель позволяет человеку не только непрерывно совершенствоваться в первоначально выбранной профессии, но и менять профессию, а иногда и не раз, на протяжении трудовой жизни.

Современному человеку очень удобно рассматривать себя как компанию, а свою жизнь как портфель различных проектов. Проектов по образованию, трудоустройству, трудовой деятельности, хобби и т.д. Некоторые проекты закрываются, потерпев неудачу; некоторые сдаются в срок и на место тех и других приходят новые проекты. Для того, чтобы проекты завершались успешно и в срок ими необходимо управлять. Одним из стандартов де-факто в управлении проектами в настоящее время стал «гибкий подход» – Agile [1].

Согласно ему, проект разбивается не на большие последовательные этапы, а на маленькие подпроекты, которые реализовываются и складываются в большой проект (см. рис. 1).

Название – Agile – семейство гибких методологий получило в 2001 году после публикации Манифеста Agile [2]. Этот Манифест закрепляет основные ценности и принципы гибкой разработки программного обеспечения.

Причем, Agile – это не подход к управлению проектами. Это именно манифест с рекомендациями о том, как лучше управлять проектами [3]. На основании этого манифеста разработаны «гибкие» подходы к управлению проектами. Например, Scrum.

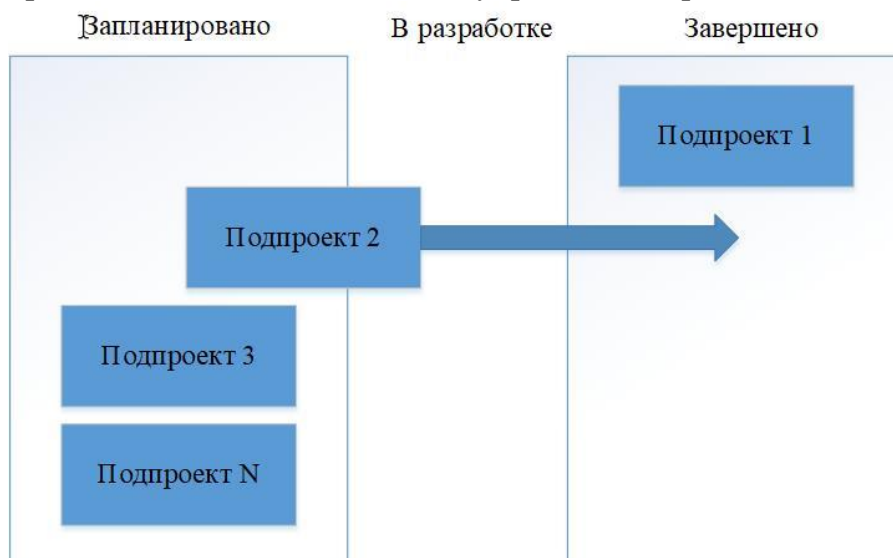


Рис. 1. Гибкий подход к управлению проектами

Нельзя отрицать, что для большинства обучающихся учеба не просто скучна, а она превратилась в повинность. Элементы игрофикации могут помочь увлечь людей обучением и сделать этот процесс более увлекательным. Например, проект classcraft [4], который представляет образовательную ролевую онлайн-игру. Classcraft не подменяет учебной программы, но является принципиально новым фоном (как по форме та и по содержанию) для проведения занятий см. рис. 2.

Наиболее очевидное применение Agile – это управление разработкой различных образовательных и учебно-информационных продуктов. В качестве примеров могут служить разработка (написание, съемка) учебников, методические пособия, учебных программ, видео лекций и т.д. Проекты являются инновационными и, учитывая сильные стороны Agile, можно утверждать, что он хорошо подходит для подобных разработок. В проектах по разработке таких продуктов высока степень неопределенности. В таких условиях реализовать проект по водопадной (классической) модели становится невозможно, т.к. информация для планирования быстро устаревает.

Методология Agile опробована нами при проектировании и теперь используется на этапе разработки (т.е. создания) программного обеспечения в рамках научно-исследовательского проекта. Примером использования гибкой методологии могут служить: разработка пользовательских историй (требований) и создание backlog'a (списка задач, действий и процедур, которые необходимо выполнить или пройти на пути от начала разработки до финальной версии программного обеспечения).

Примерами пользовательских историй могут служить следующие три пользовательские истории:

1. Я, как пользователь ПО, хочу иметь возможность видеть необработанное ОКТ-изображение, а не массив ОКТ-данных.

2. Я, как пользователь ПО, хочу иметь возможность применять к ОКТ-изображению различные цветовые палитры для улучшения его восприятия.

3. Я, как пользователь ПО, хочу иметь возможность масштабировать ОКТ-изображение.



Рис. 2. Пример интерфейса игрофицированного образовательного проекта classcraft

Приведенные выше пользовательские истории отображают видение разрабатываемого в рамках научной деятельности программного обеспечения не только с точки зрения ученого, но и с точки зрения пользователя, который будет им пользоваться. Такой подход позволяет более полно взглянуть на результат научной деятельности, который может быть заключен не только в программном обеспечении, но и в других продуктах (книгах и т.д.).

Второй вариант применения Agile – это планирование личной образовательной траектории. Для такого планирования можно привлечь адаптированный под образовательные проекты манифест Agile:

- личности и взаимодействия важнее процессов и инструментов;
- содержание образования важнее отчетности;
- сотрудничество важнее переговоров;
- готовность изменяться важнее следования плану.

Рекомендации следует понимать именно как рекомендации. Они не отрицают необходимости того что справа, однако указывают, что ценить больше нужно то что слева и, в первую очередь, руководствоваться именно этими категориями.

Авторы лично используют инструменты Scrum для планирования самообразования. Scrum – это набор инструментов и правил их использования, которые отвечают методологии Agile. Примером такого использования может служить Scrum-доска, на которой приведены дисциплины и курсы, которые хочет изучить автор, и книги для прочтения. Доска помогает увидеть всю картину, целиком не создавая при этом очереди из изучаемых дисциплин (см. рис. 3). После изучения одной из них человек может перейти к другой, наиболее важной в данное время, или внести на доску новую дисциплину/курс/книгу и начать изучать ее. Планирование образовательной траектории с помощью такого инструмента становится наглядным и гибким.

Элементом игрофикации в таком планировании является контроль суммы баллов за задания, которые удалось набрать за 2 недели или месяц. Необходимо

пытаться превзойти собственный показатель и установить новый рекорд. Так прогресс становится измеримым и появляется элемент соревнования, возможно с собой.

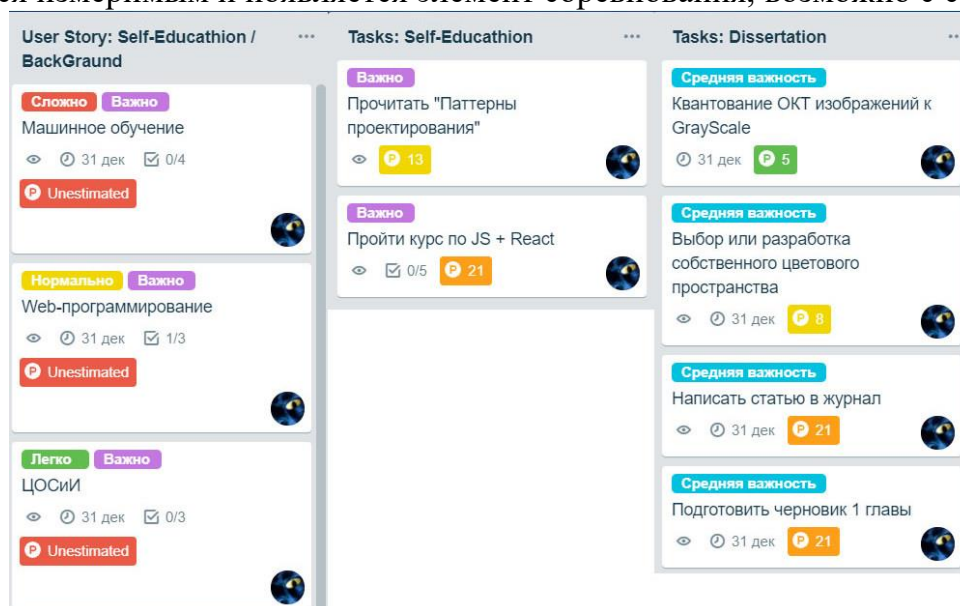


Рис. 3. Scrum-доска

Заключительные вариант использования Agile – это педагогическая стратегия (педагогическая технология). Под педагогической стратегией (педагогической технологией) понимается система педагогических воздействий и взаимодействия с обучающимися в соответствии с идеальным представлением о конечном результате профессиональной деятельности (усвоении материала обучающимися). Правильно выстроить педагогическую стратегию помогут принципы Agile адаптированные для образования [5].

Опираясь на инструменты, которые предоставляет Scrum, можно осуществлять постановку задачи на дипломный проект и магистерскую диссертацию и осуществлять работу над ними используя инкрементный подход. Авторы осуществляли дипломное руководство студентами используя Scrum. Первый эксперимент показал, что руководитель дипломного проекта лучше ориентируется в фактическом положении дел в дипломе на любой момент времени дипломного проектирования.

Таким образом, можно заключить, что Agile методология и игрофикация являются перспективными инструментами для осуществления планирования и мониторинга в различных аспектах образования и самообразования.

#### Библиографический список

1. QASymphony, Inc. // Атланта, 2018. URL: <https://www.qasymphony.com/blog/agile-methodology-guide-agile-testing/> (дата обращения: 19.10.2018).
2. Manifesto for Agile Software Development. URL: <http://agilemanifesto.org/> (дата обращения: 19.10.2018).
3. Сазерленд Дж. Scrum. Революционный метод управления проектами // пер. с англ. М. Гескина. 2-е изд. Москва : Манн, Иванов и Фербер. 2017. 272 с.
4. Classcraft URL: <https://www.classcraft.com/> (дата обращения: 19.10.2018).
5. Agile Classrooms URL: <http://agileclassrooms.wikidot.com/principles> (дата обращения: 19.10.2018).

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ МЕТРИК РАССТОЯНИЙ

А.С. Сидорович\*, Е.А. Сасин\*\*

\* Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Беларусь, Минск, a.s.sidorovich@gmail.com

\*\* Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Беларусь, Минск, sasin@bsuir.by

*Аннотация.* Описаны различные метрики расстояний. Приведено их сравнение с точки зрения вычислительной сложности. Сделано предположение о возможном использовании комбинированных метрик расстояния, в основе которых лежат наиболее вычислительно эффективные метрики Манхэттена и Чебышева.

Ключевые слова: расстояние, метрика, кластеризация, евклидово расстояние.

## COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF BASIC DISTANCE METRICS

A.S. Sidarovich\*, E.A. Sasin\*\*

\* Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Belarus, Minsk, a.s.sidorovich@gmail.com

\*\* Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Belarus, Minsk, sasin@bsuir.by

*Abstract.* Various distance metrics are described. Their comparisons from the point of view of computational complexity are given. An assumption was made about the possible use of combined distance metrics, which are based on the most computationally efficient metrics of Manhattan and Chebyshev.

*Keywords:* distance, metric, clustering, Euclidean distance.

**1. Введение.** Развитие методов работы с информацией привело к ее увеличению до колоссальных объемов. Для удобства работы с информацией проектируются и используются базы данных. В большинстве они таких размеров, что получение и анализ данных из них является проблемой. Часто для решения таких задач используется Data Mining. Здесь Data Mining — собирательное название, используемое для обозначения совокупности методов обнаружения в данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности.

**2. Кластерный анализ.** Одним из методов Data Mining является кластеризация (кластерный анализ). Кластеризация занимается разбиением данных на группы (кластеры) на основе схожести определенных признаков [1,2]. Методы кластерного анализа позволяют решать следующие задачи:

- проведение классификации объектов с учетом признаков, отражающих сущность объектов;
- проверка выдвигаемых предположений о наличии некоторой структуры в изучаемой совокупности объектов;
- построение новых классификаций для установления наличия связей внутри совокупности;
- сжатие данных — если исходная выборка избыточно большая, можно сократить ее, оставив по одному наиболее типичному представителю от каждого кластера.

Опишем обобщенный алгоритм всех используемых методов кластеризации: случайным образом выбираются центры кластеров. Вычисляются расстояния от каждого объекта до центра каждого кластера. Объекты причисляются к кластерам. Производится пересчет центров каждого кластера. Если центры не изменились, то работа алгоритма заканчивается, иначе продолжаем работу алгоритма с вычисления расстояния.

**3. Способы вычисления расстояния.** Для вычисления расстояний между центрами кластеров используются различные метрики. Тремя наиболее

распространёнными метриками расстояний являются классическая Евклидова и Чебышева и Манхеттена.

При этом можно наблюдать, что первая наиболее часто применяется при разработке новых алгоритмов интеллектуальной обработки данных. Она является эталонно равномерной из всех мер расстояний.

Метрики Чебышева и Манхеттена часто применяются в реальной практике, так как вычислительно они значительно эффективнее, чем Евклидова метрика. Часто замена Евклидовой меры на Чебышева или Манхеттена вносит некоторые искажения в работу системы, так что имеет смысл поиск более оптимальной метрики, которая с одной стороны вычислительно эффективна, с другой по равномерности максимально приближается к Евклидовой.

В целом кроме описанных выше мер расстояний существует набор альтернатив [3,4]. К наиболее известным метрикам можно отнести:

- евклидово расстояние  $d_e(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$  ;
- квадрат евклидового расстояния  $d_{es}(x, y) = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2$  ;
- манхэттенское расстояние  $d_m(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$  ;
- расстояние Чебышёва  $d_{ch}(x, y) = \max_{i=1}^n |x_i - y_i|$  ;
- степенное расстояние  $d_u(x, y) = \sqrt[r]{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^p}$  .

В списке опущены несимметричные метрики, в которых не все координатные составляющие являются «равноправными». Подобные случаи часто могут быть решены предварительной нормализацией входных данных алгоритма.

Евклидова мера расстояний используется наиболее часто при разработке различных алгоритмов анализа данных, потому что является абсолютно гомогенной, т.е. абсолютно одинаковая во всех направлениях. В полярной системе координат это выражается в константности радиуса для любого угла. Вычислительно она представляется крайне тяжёлой для эффективной аппаратной реализации. Если убрать вычисление квадратного корня, что является распространённой практикой, остаётся множество операций возведения в степень.

Расстояния Чебышева и Манхеттенская метрика (расстояние городских кварталов), напротив, являются максимально быстродействующими и потому часто применяются в задачах, критичных к быстродействию. Но при этом они совершенно не так гомогенны и потому результат выполнения алгоритмов с их применением часто будет в определенной степени отличаться от того, который предполагался исследователями, разрабатывавшими алгоритм изначально с расчётом на Евклидову метрику.

**4. Заключение.** При анализе и подготовке данных для кластеризации важно учитывать, что использование некоторых метрик расстояния значительно увеличивает время на обработку и вычислительные ресурсы. В то время как другие варианты вычисления расстояний могут приводить к значительным погрешностям вычислений и получению ложного результата. Необходимо принимать к сведению, что евклидова метрика используется в таких случаях, как:

наблюдения, то есть входное множество объектов, берётся из генеральной совокупности, имеющей многомерное нормальное распределение. Исходные признаки объектов выборки взаимно независимы и имеют одну дисперсию.

исходные признаки каждого из объектов однородны по физическому смыслу и одинаково важны для классификации.

Манхэттенская метрика имеет довольно обширную область применения, в теории игры в шахматы, а также в теории клеточных автоматов.

Сравнение обозначенных метрик расстояния в виде их единичных окружностей проведено на рис. 1. На рисунке изображен только участок  $[0, \pi/4]$  так как все перечисленные метрики симметричны по октантам.

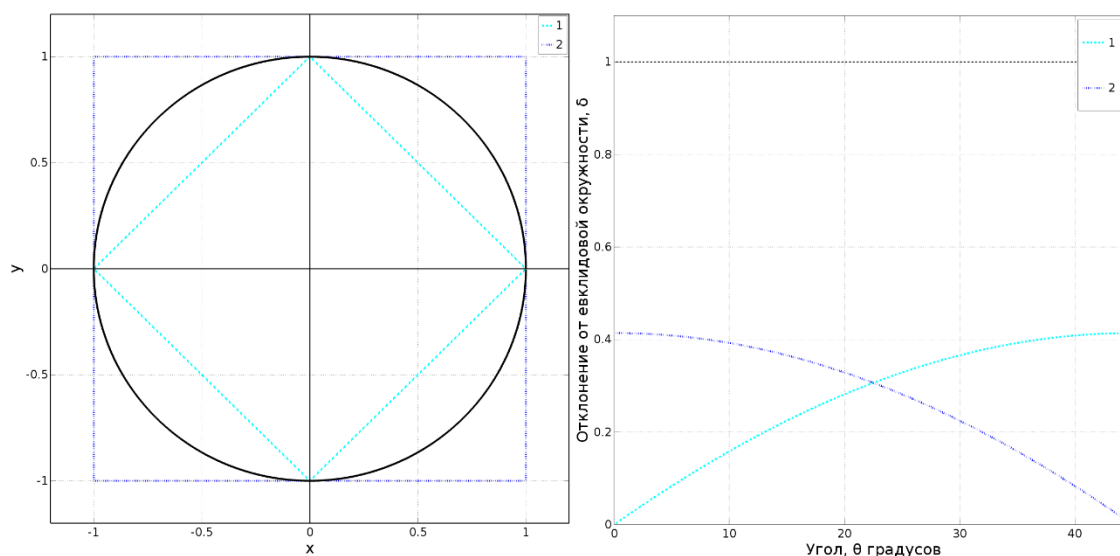


Рис. 1. Сравнение единичных окружностей (слева – в декартовой системе координат, справа - отображение полярной системы координат): 1 – Евклидова метрика, 2 – манхэттенская метрика, 3 – метрика Чебышева

Можно видеть, что Манхэттенская мера расстояния эквивалентна повернутой на  $45^\circ$  метрике Чебышёва с единственным отличием в том, что первая является вписанной в евклидову окружность, тогда как вторая – описана. Последнее играет малое значение, т.к. на практике масштаб меры расстояний роли в качестве классификации не играет.

В некоторых работах по кластеризации и классификации используются адаптивные метрики [5]. Однако их суть, как правило, заключается в изменении масштаба координат по-отдельности и, таким образом, может быть вынесена на этап предобработки векторов.

Таким образом, можно предположить, что существует множество комбинированных метрик, которые позволяют увеличить скорость обработки без потерь точности выполнения.

### Библиографический список

1. Ester M. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, Xu Xiaowei – Institute for Computer Science, University of Munich. 1996. p. 226–231.
2. Ankerst M. OPTICS: Ordering Points To Identify the Clustering Structure / M. Ankerst, M. M. Breunig, H.-P. Kriegel, J. Sander – ACM SIGMOD international conference on Management of data. 1999. p. 49–60.
3. Cios K.J., Pedrycz W., Swiniarski R.W., Kurgan L. Data Mining: A Knowledge Discovery Approach. Springer. 2007.
4. Старовойтов В.В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений. Мн.: ИТК НАН Беларуси. 1997. 284с.
5. Xing E.P., Jordan M. I., Russell S. A. Ng. Distance Metric Learning with Application to Clustering with Side-Information // Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems. 2002. Vol. 15. p. 505–512.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УЧЁТА ТРЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА С ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ

<sup>1</sup>А.А. Мазур, <sup>2</sup>А.А. Большаков

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург, <sup>1</sup>mazuralexey93@gmail.com, <sup>2</sup>abolshakov57@gmail.com*

*Аннотация.* Рассмотрены основные виды конструкций промышленных манипуляторов. Исследована конструкция промышленного манипулятора с вращательными сочленениями на примере робота-манипулятора ПУМА(РМ-01). Сформированы матрицы преобразования координат. Предложены уравнения кинематики и динамики манипулятора. Вычислены значения динамических коэффициентов манипулятора. Определены управляющие моменты и мощности. Выявлено влияние различных видов трения на энергетические затраты.

*Ключевые слова:* магистерская диссертация, промышленный манипулятор, кинематика манипулятора, динамика манипулятора, динамические коэффициенты манипулятора, кинетическая и потенциальная энергия, метод Лагранжа-Эйлера, уравнения движения манипулятора.

## MATHEMATICAL SUPPORT FOR ACCOUNTING FRICTION ACCOUNTING PROGRAM FOR ENERGY COSTS OF INDUSTRIAL MANIPULATOR WITH ROTARY MOVEMENTS

<sup>1</sup>A.A. Mazur, <sup>2</sup>A.A. Bolshakov

*Peter the Great St. Petersburg Polytech University,  
Russia, St. Petersburg, <sup>1</sup>mazuralexey93@gmail.com, <sup>2</sup>abolshakov57@gmail.com*

*Abstract.* The main types of industrial manipulator designs are considered. The design of an industrial manipulator with rotational joints is studied using the example of the robot manipulator PUMA (PM-01). Coordinate transformation matrices are composed. Equations of kinematics and dynamics of the manipulator are compiled. The dynamic coefficients of the manipulator are calculated. Control moments and powers are calculated. The influence of various types of friction on energy costs has been revealed.

*Keywords:* master's thesis, industrial manipulator, manipulator kinematics, manipulator dynamics, dynamic manipulator coefficients, kinetic and potential energy, Lagrange-Euler method, manipulator equations of motion.

*Актуальность.* Автоматизация производства неизменно приводит к развитию машиностроения, в частности, робототехники, причем актуальность сложных технологических процессов, выполняемых в недетерминированных условиях для замены человека при выполнении тяжелых, утомительных и опасных работ, с течением времени только возрастает. Наибольшее распространение получили промышленные роботы или манипуляторы. Манипуляторы выполняют широкий спектр задач, таких как процесс сварки, паллетирования, механической обработки, окраски, сборки или пригодны для выполнения альтернативных заданий. Произведя правильный расчёт промышленного манипулятора, можно предсказать энергетические затраты или внести изменения в конструкцию для оптимизации ее работы.

Формирование эффективных уравнений динамики манипуляционных роботов, которые могут быть рассчитаны на ЭВМ за минимальное время, является одной из важнейших задач в робототехнике. Ее решение необходимо для моделирования динамики манипуляторов в масштабе реального времени, для разработки эффективных алгоритмов управления роботами с учетом динамики [1], для повышения эффективности исследования и разработки манипуляторов. [2]

*Цели и задачи работы.* Целью работы является исследование трехзвенного промышленного манипулятора с вращательными сочленениями, расчёт

кинематических и динамических параметров, выбор управления, определение влияния различных типов трения на мощность и, следовательно, на энергетические затраты.

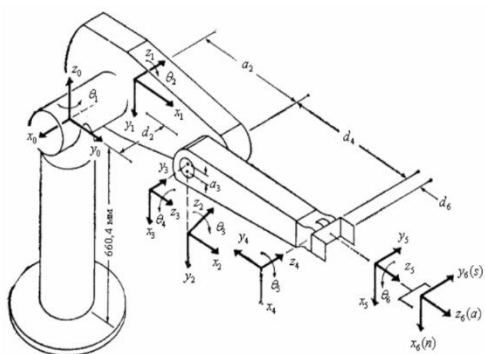


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора

манипуляторов используются различные законы и формулировки общих уравнений динамики систем. Среди них можно выделить методы, основанные на уравнениях Лагранжа, Ньютона-Эйлера, Д'Аламбера.

Полное описание движения манипулятора получено с применением метода Лагранжа-Эйлера для неконсервативных систем. Описав кинематику манипулятора с помощью матричного представления Денавита-Хартенберга [3], получаем уравнение динамики. Такое совместное использование Д-Х-представления и метода Лагранжа приводит к компактной векторно-математической форме уравнений движения, удобной для аналитического исследования и допускающей реализацию на ЭВМ.

Вывод уравнений динамики движения манипулятора основан на следующем:

1. На основе описания взаимного пространственного расположения систем координат  $i$ -го и  $(i-1)$ -го звеньев получаем матрицу преобразования однородных координат  ${}^{i-1}A_i$ . Эта матрица преобразует координаты произвольной точки относительно  $i$ -й системы координаты этой же точки относительно  $(i-1)$ -й системы координат.

2. На использовании уравнения Лагранжа-Эйлера:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

где  $L$ -функция Лагранжа ( $L=K-P$ );  $K$ -полная кинетическая энергии манипулятора;  $P$ -полная потенциальная энергия манипулятора;  $q_i$ -обобщённые координаты манипулятора;  $\dot{q}_i$  - первая производная по времени обобщённых координат;  $\tau_i$ -обобщённые силы (или моменты), создаваемые в  $i$ -м сочленении для реализации заданного движения  $i$ -го звена.

В статье [4] показано, что момент трения в сочленении манипулятора можно представить в виде суммы трех компонентов: сухого трения, вязкого трения и трения, пропорционального угловой скорости в степени  $(1/3)$ , т.е.:

$$M_i^{fr} = -M_{i1} \operatorname{sgn} \omega_i - M_{i2} \omega_i - M_{i3} |\omega_i|^{1/3} \operatorname{sgn} \omega_i$$

Будем считать, что коэффициенты трения одинаковы для всех звеньев. Используя данные работы [5], примем эти коэффициенты равными следующим значениям:  $M_1 = 6$  Н\*м – коэффициент сухого трения;  $M_2 = 9$  Н\*м – коэффициент вязкого трения;  $M_3 = 5$  Н\*м- коэффициент трения, пропорционального угловой скорости в степени  $1/3$ .

Чтобы оценить энергетические затраты, необходимо определить мощность.

Для вычисления подаваемой мощности управляющий момент умножаем на угловую скорость звена (см. рис. 2).

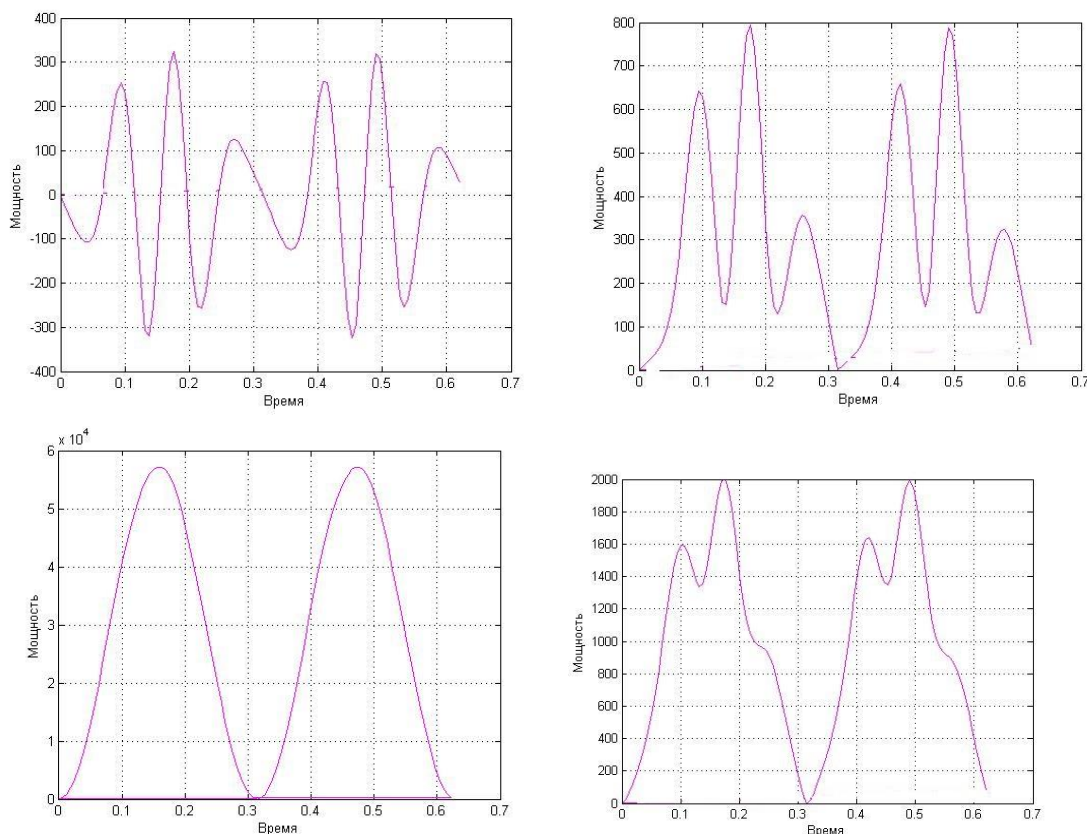


Рис. 2. Мощности для третьего звена манипулятора при отсутствии трения (слева сверху), при сухом трении (справа сверху), при вязком трении (слева внизу) и при вязком трении пропорциональном скорости в степени (1/3) (справа внизу) для значений угловой скорости=10

**Результаты.** В процессе выполнения работы, а именно моделирования и исследования шестизвенного манипулятора с вращательными сочленениями, а также исследования зависимости различных видов трения на энергетические затраты можно сделать следующие выводы.

При увеличении частоты прямо пропорционально увеличиваются значения управляющих моментов. Присутствующие моменты трения в сочленениях манипулятора существенно влияют на управление и энергопотребление. Чем выше значение управляющих моментов, тем большая мощность, а значит и энергетические затраты требуются для управления манипулятором. Сухое трение увеличивает мощность прямо частоте. Оно играет определяющую роль при небольших угловых скоростях. Вязкое трение при малых скоростях вносит меньший вклад в увеличение мощности, чем сухое трение, однако при больших скоростях влияние вязкого трения становится определяющим. О явлении трения, пропорционального скорости в степени 1/3, можно сделать следующий вывод: при небольших угловых скоростях его вклад больше, чем вязкого трения, с ростом угловой скорости его влияние становится большим, чем влияние сухого трения, но значительно меньшим, чем влияние вязкого трения.

#### Библиографический список

1. Friction and rigid body identification of robot dynamics // International Journal of Solids and Structures 38 (2001) 1889-1902.
2. Cheng Chen. Friction modeling Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир. 1989.
3. Белоусов И.Р. Calculation of the Robot Manipulator Dynamic Equations. Препринт. / Формирование уравнений динамики роботов манипуляторов. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. 2002.
4. Denavit J, Hartenberg R.S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices., J. Appl. Mech., 77. 1955. с.215-221.
5. Grotjahn M., Daemi M., Heimann and experimental identification of a mitsubishi PA10-6CE robot manipulator. Master Thesis. University of Florida. 2013.

УДК 66.021.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКТИФИКАЦИИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО<sup>4</sup>

**И.П. Анашкин\*, С.В. Казанцев\*\***

*\*Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
Россия, Казань, anashkin.ivan@gmail.com*

*\*\* Казанский федеральный университет,  
Россия, Казань, s@kazancev.xyz*

*Аннотация.* Предложен молекулярно-статистический метод моделирования процесса ректификации. Метод основан на использовании ансамбля Гиббса для расчета фазового равновесия компонентов разделяемой смеси и законах сохранения.

*Ключевые слова:* ректификация, метод Монте-Карло, фазовое равновесие

### MONTE CARLO SIMULATION OF RECTIFICATION PROCESS

**I.P. Anashkin\*, S.V. Kazancev\*\***

*\* Kazan National Research Technological University,  
Kazan, Russia, anashkin.ivan@gmail.com*

*\*\* Kazan Federal University,  
Kazan, Russia, s@kazancev.xyz*

*Abstract.* A molecular-statistical method for simulation the rectification process is proposed. The method is based on the use of the Gibbs ensemble to calculate the phase equilibrium of the components of the separated mixture and the conservation laws.

*Keywords:* rectification, Monte Carlo, phase equilibrium.

Ректификация – один из наиболее распространенных процессов разделения смесей, применяемых в химической промышленности. Для расчета процесса ректификации разработано множество подходов, в основе которых лежит использование данных о фазовом равновесии компонентов разделяемой смеси. Таким образом, расчетную схему ректификационной колонны необходимо дополнить моделями для описания давления насыщенных паров чистых компонентов и коэффициентов активности в смеси. Однако экспериментальные данные доступны не для всех комбинаций веществ, или доступны в ограниченной области состояний. Решением может выступать использование методов групповых составляющих [1], однако они не гарантируют хорошего согласования с экспериментальными данными.

В настоящее время широко применяются методы молекулярно-статистического моделирования для расчета свойств чистых веществ и их смесей в однофазной области. Для расчета свойств смесей на линии фазового равновесия предложен ансамбль Гиббса [2,3], основанный на моделировании методом Монте-Карло двух ячеек, соответствующих различным фазам, в которых поддерживается равенство температуры, давления и химического потенциала. Однако текущий уровень развития вычислительной техники не позволяет напрямую применять ансамбль Гиббса для расчета процесса ректификации, а служит лишь заменой экспериментальных данных для дальнейшей подстройки параметров модели фазового равновесия.

В работе предлагается молекулярно-статистический метод для моделирования процесса ректификации. Согласно предлагаемому методу, ректификационная колонна делится на участки, аналогичные теоретическим тарелкам (теоретическим ступеням). Каждая из тарелок делится на две ячейки, которые соответствуют газовой и жидкой фазам. Свойства каждой из фаз рассчитываются методом Монте-Карло. Достоинством

---

<sup>4</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-38-00011 мол-а).

метода является возможность одновременного расчета условий фазового равновесия на тарелках и потоков компонентов на тарелках, что позволяет не использовать математические модели описания фазового равновесия.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета

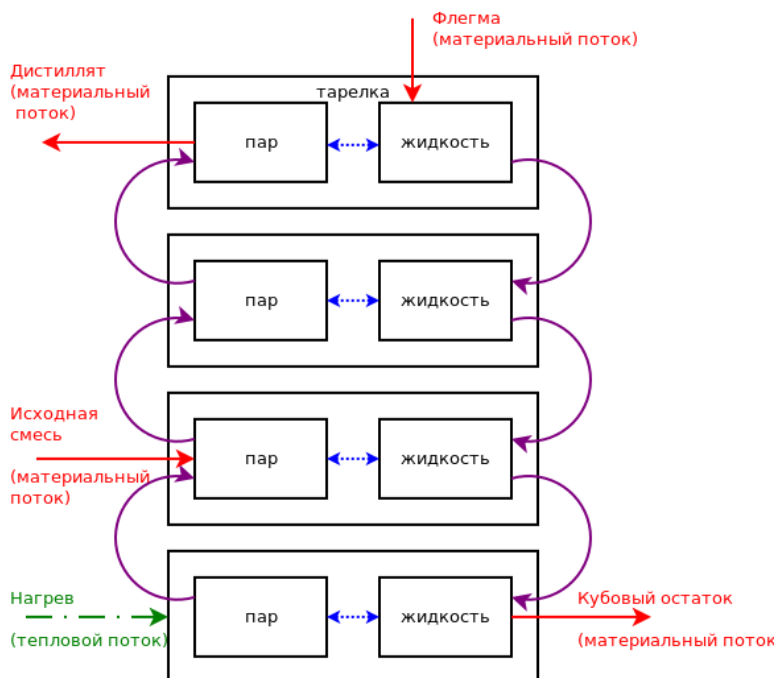


Рис. 2. Схематическое изображение ректификационной колонны (цвет соответствует различным этапам, представленным на рис. 1)

На первом этапе проводится расчет свойств, входящих в ректификационную колонну материальных потоков. Исходя из условия, что на тарелку подается равновесный пар, необходимо задать концентрацию компонентов, температуру, плотность жидкой фазы или давление смеси. Далее проводится расчет условий фазового равновесия и определяются составы и термодинамические свойства паровой и жидкой фаз. Полученные данные используются далее при добавлении молекул в моделируемые ячейки.

На каждой тарелке рассчитывается фазовое равновесие с использованием ансамбля Гиббса. Равновесный пар идет на верхнюю тарелку, а равновесная жидкость на нижнюю тарелку. После перемещения молекул на каждой из тарелок вычисляется температура по внутренней энергии газовой и жидкой фаз. Для этого используется NVE ансамбль [4] (ансамбль при постоянном количестве компонентов, объеме ячейки и энергии). Цикл повторяется для каждой тарелки.

На каждой из тарелок можно дополнительно вводить выходящие потоки. При этом можно возвращать часть потока обратно в колонну, вводя флегмовое число для каждого из потоков.

На каждой из тарелок можно задать тепловой поток в виде отводимой или подводимой энергии. Энергия будет изменяться на этапе пересчета температуры на тарелке. Описанный алгоритм представлен на рис. 1. На рис. 2 представлена схематическое распределение потоков в ректификационной колонне. Цвет стрелок и текста соответствует различным этапам алгоритма, представленного на рис. 1.

Усреднение свойств смеси на тарелках и выходных потоках (концентрации, температуры, давления и т.д.) проводится после установления стационарности. Достижение стационарности можно отследить по неизменности составов и количества молекул на каждой тарелке.

На текущем этапе реализован ввод исходной информации, необходимой для расчета: структура молекул разделяемых веществ, исходные материальных и тепловые потоки, а также топология молекулы (межмолекулярное и внутримолекулярное взаимодействие). Файлы структуры молекулы и топологии используются такие же, как в программном пакете GROMACS [5-7]. Программный пакет широко применяется в научном сообществе и для него создано множество, реализующих различные наборы параметров межмолекулярного взаимодействия.

Исходные файлы структуры молекулы содержатся в файле с расширением gro. В файле содержатся координаты и компоненты скорости всех атомов в молекуле. Этот формат файлов поддерживается множеством программ для создания структуры молекул [8, 9].

#### Библиографический список

1. Wittig R., Lohmann J., Gmehling J. Vapor-Liquid Equilibria by UNIFAC Group Contribution. 6. Revision and Extension // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003. V. 42. № 1. p. 183–188.
2. Panagiotopoulos A.Z. Direct determination of phase coexistence properties of fluids by Monte Carlo simulation in a new ensemble // *Mol. Phys.* 1987. V. 61. № 4. p. 813–826.
3. Panagiotopoulos A.Z. Monte Carlo methods for phase equilibria of fluids // *J. Phys. Condens. Matter.* 2000. V. 12. № 3. p. R25–R52.
4. Lustig R. Microcanonical Monte Carlo simulation of thermodynamic properties // *J. Chem. Phys.* 1998. Vol. 109. № 20. p. 8816–8828.
5. Abraham M.J. et al. GROMACS: High performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers // *SoftwareX.* 2015. V. 1–2. p. 19–25.
6. Berendsen H.J.C., van der Spoel D., van Drunen R. GROMACS: A message-passing parallel molecular dynamics implementation // *Comput. Phys. Commun.* 1995. V. 91. № 1–3. p. 43–56.
7. Pronk S. et al. GROMACS 4.5: a high-throughput and highly parallel open source molecular simulation toolkit // *Bioinformatics.* 2013. V. 29. № 7. p. 845–854.
8. DeLano W.L. The case for open-source software in drug discovery // *Drug Discov. Today.* 2005. V. 10. № 3. p. 213–217.
9. Geldenhuys W.J. et al. Optimizing the use of open-source software applications in drug discovery // *Drug Discov. Today.* 2006. V. 11. № 3–4. p. 127–132.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ<sup>5</sup>

Ю.А. Гольцов\*, А.С. Кижук\*\*, В.Г. Рубанов\*\*\*

\* *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, umin@mail.ru*

\*\* *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, kizhuka@mail.ru*

\*\*\* *Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, vgrubanov@gmail.com*

*Аннотация.* Предложено и изготовлено энергоэффективное нагревательное устройство, которое может быть использовано для обеспечения температурных режимов промышленных теплотехнических установок высокой мощности. Показано, что использование свойства полевого транзистора существенно увеличивать значение допустимого тока в кратковременном импульсном режиме приводит к возможности реализации гибкого управления большой мощностью.

*Ключевые слова:* мощная нагревательная установка, полевой транзистор, кристалл сапфира, энергоэффективность, промышленный контроллер.

### A HIGH-POWER ENERGY-EFFICIENT HEATING UNIT

Yu. A. Gol'tsov\*, A. S. Kizhuk\*\*, V. G. Rubanov\*\*\*

\* *Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, umin@mail.ru*

\*\* *Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, kizhuka@mail.ru*

\*\*\* *Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, vgrubanov@gmail.com*

*Abstract.* We propose an energy-efficient heating unit that can be used to provide the desired temperature modes for the high-power industrial technological equipment. Here is shown that using of FET properties of significantly increasing the value of able current in the short-pulse mode led to the possibility of implementing a flexible control of high-power.

*Keywords:* high-power heading unit, sapphire crystal, energy efficiency, field-effect transistor, industrial controller.

Технология выращивания монокристаллов представляет собой процесс управляемой кристаллизации, при котором качество растущего кристалла определяется точностью управления условиями фазовых переходов [1]. При выращивании кристалла синтетического сапфира необходимо обеспечить закон изменения температуры в тигле от 25°C до 2050°C с определённой степенью наращивания и спада температуры, что предполагает применение автоматической системы управления с возможностью программного задания изменения температуры в тигле с заданной точностью [2].

Используемые в настоящее время регуляторы температуры с тиристорными исполнительными устройствами всех типов существенно искажают форму кривой тока, потребляемого из сети, приводя к возникновению в питающей сети несинусоидальных режимов.

Устранить отмеченные недостатки и упростить систему регулирования представляется возможным, применив в качестве исполнительного устройства полевые транзисторы.

Задачи энергоэффективности решаются в системе управления высокой мощности, разработанной авторами [3-5], оригинальность которой подтверждается патентом РФ

---

<sup>5</sup> Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

[6]. Предложен новый способ управления нагревательным устройством в технологическом процессе выращивания монокристалла сапфира. Разработана принципиальная схема управления ключами, реализованными на полевых транзисторах. Для пояснения работы устройства приведена его электрическая схема (рис. 1).

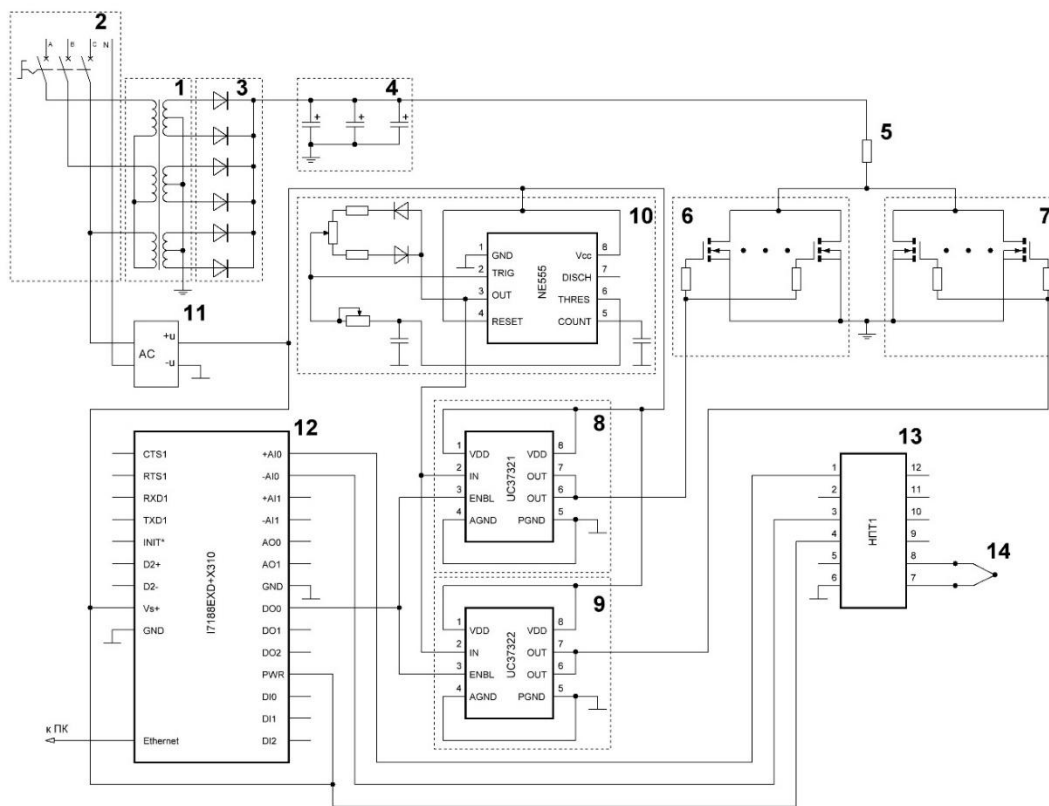


Рис. 1. Энергоэффективное нагревательное устройство

В контуре управления используется промышленный контроллер SMH 2010 [7]. Измерение текущей температуры нагревателя производится термопарой, сигнал с которой посредством нормирующего преобразователя передается на модуль аналогового ввода контроллера. С целью обеспечения высокой мощности энергетической установки при работе в промышленной сети питания применен трехфазный трансформатор. Использована особенность работы полевого транзистора в импульсном режиме, заключающаяся в уменьшении сопротивления сток-исток полевого транзистора при кратковременной длительности управляющего импульса.

Обеспечение работы полевого транзистора в импульсном режиме возможно заданием времени длительности управляющих импульсов, подаваемых на затвор. Для транзистора IRF3205 согласно зависимости тока истока от напряжения сток-исток и длительности управляющего импульса, подаваемого на затвор полевого транзистора, выбрано время коммутации управляющих импульсов длительностью 10 мкс...100 мкс [8]. Так как промышленный контроллер не способен коммутировать импульсы управления полевыми транзисторами длительностью порядка 10 мкс, возникает необходимость построения дополнительного преобразователя импульсов, приходящих с его дискретного выхода, в короткие импульсы управления полевыми транзисторами IRF3205. Эту задачу позволяет решить работающий в автоколебательном режиме интегральный таймер NE555. Использование микросхемы таймера совместно с внешними RC-цепями дает возможность устанавливать заданную длительность и частоту следования импульсов управления для организации поочередной работы двух групп транзисторов. Для обеспечения требуемой мощности увеличивается количество

параллельно соединенных полевых транзисторов пропорционально в каждой группе. При этом потребление мощности из питающей электросети становится непрерывным.

Устройство (рис. 1) работает следующим образом. При подаче напряжения от трехфазной сети переменного тока 2 запитываются первичные обмотки трехфазного трансформатора 1, и далее со вторичных обмоток пониженное до требуемой амплитуды напряжение преобразуется посредством диодных выпрямителей 3 в постоянное напряжение, пульсации которого сглаживаются батареей электролитических конденсаторов 4, и подводится к резистивному нагревателю 5. Также от трехфазной сети переменного тока 2 запитывается источник питания постоянного тока 11, с выхода которого постоянное напряжение питания подводится к промышленному контроллеру 12, нормирующему преобразователю 13, мультивибратору 10, инвертирующему драйверу 8 и неинвертирующему драйверу 9. С момента подачи напряжения питания мультивибратор 10 генерирует прямоугольные импульсы определенной скважности и частоты, задавая импульсный режим работы групп 6 и 7 полевых транзисторов, и организует подачу этих импульсов на информационные входы IN инвертирующего драйвера 8 и неинвертирующего драйвера 9, определяя этим очередность и моменты включения работающих противофазно групп 6 и 7 полевых транзисторов. Одновременно с этим промышленный контроллер 12, согласно алгоритму управления, выключает свой дискретный выход DO0, устанавливая запрещающий потенциал на управляющих выводах ENBL инвертирующего драйвера 8 и неинвертирующего драйвера 9, блокируя этим их выходы OUT и создавая на них напряжение низкого уровня, поступающее на затворы первой 6 и второй 7 групп полевых транзисторов соответственно. В свою очередь, напряжение низкого уровня затвор-исток групп 6 и 7 полевых транзисторов создает в их сток-истоковых переходах высокое сопротивление, закрывая их для прохождения электрического тока через полевые транзисторы и резистивный нагреватель 5, по этой причине процесс нагрева не происходит.

Для активации процесса нагрева промышленный контроллер 12, в соответствии с заданным алгоритмом управления, включает свой дискретный выход DO0, создавая разрешающий потенциал на управляющих выводах ENBL инвертирующего драйвера 8 и неинвертирующего драйвера 9 и активируя этим их выходы OUT. Одновременно на выходе OUT мультивибратора 10, на информационных входах IN инвертирующего драйвера 8 и неинвертирующего драйвера 9 возникают сгенерированные импульсы заданной скважности и частоты, определяющие моменты коммутации групп 6 и 7 полевых транзисторов. С выходов OUT инвертирующего драйвера 8 и неинвертирующего драйвера 9 импульсные напряжения высокого и низкого уровней подаются через токоограничивающие резисторы на затворы соответствующих групп 6 и 7 полевых транзисторов, управляя попеременным открыванием-закрыванием их каналов сток-исток. При подаче напряжения высокого уровня на затворы одной из групп 6 или 7 полевых транзисторов устанавливаются малые сопротивления каналов сток-исток полевых транзисторов, что способствует открыванию каналов и протеканию через них тока питания резистивного нагревателя 5, одновременно на затворы другой группы 7 или 6 полевых транзисторов подается напряжение низкого уровня, устанавливающее большие сопротивления каналов сток-исток полевых транзисторов соответствующей группы, что способствует закрыванию каналов сток-исток.

Для регулирования температуры электронагрева, значение которой измеряется термопарой 14 и посредством нормирующего преобразователя 13 подается в промышленный контроллер 12, достаточно включать или выключать в определенные

промежутки времени, в соответствии с заданным алгоритмом, дискретный вывод DOO промышленного контроллера 12, блокируя или активируя этим выходы OUT инвертирующего драйвера 8 и неинвертирующего драйвера 9, тем самым управляя коммутацией групп 6 и 7 полевых транзисторов соответственно, обеспечивающих работу резистивного нагревателя 5.

Рассмотренное энергоэффективное нагревательное устройство позволит расширить временной диапазон рабочих токов и увеличить управляемую мощность электронагрева за счет добавления второй группы полевых транзисторов, работающей противофазно первой, и дополнительного использования управляющих инвертирующего и неинвертирующего драйверов, позволяющих организовать полный период управления моментами коммутации двух групп мощных полевых транзисторов, а так же за счет их пропорционального количественного увеличения при параллельном включении в каждой группе, ограниченного лишь нагрузочной способностью используемых драйверов, что позволит подвести к резистивному нагревателю всю поступающую от трехфазной сети переменного тока энергию.

В то же время, реализация положительных свойств систем с импульсной модуляцией является сложной задачей. Это обусловлено тем, что в импульсных системах при вариации параметров возможно возникновение колебаний на пониженных частотах, кратных частоте модуляции, квазипериодических и хаотических режимов [9-11].

Дальнейшее совершенствование энергоэффективного нагревательного устройства для обеспечения температурных режимов промышленных теплотехнических установок высокой мощности возможно путем разработки и реализации широтно-импульсной системы управления тепловыми режимами с применением промышленного контроллера SMH 2010 и введения дополнительных контуров регулирования охлаждения корпуса нагревателя, внутри камерного разряжения и т.п., причем все эти подсистемы могут быть выполнены на том же контроллере, так как его оставшиеся ресурсы оказываются достаточными для этих целей.

#### Библиографический список

1. Лодиз Р., Паркер Р. Рост монокристаллов. М.: Мир. 1974. 540 с.
2. ООО «Техсапфир». URL: <http://www.techsapphire.ru/> (дата обращения: 25.06.2018).
3. Кижук А.С., Гольцов Ю.А. Микропроцессорная система автоматического управления тепловым режимом технологического процесса выращивания кристалла сапфира // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. №11. С. 42–49.
4. Gol'tsov Yu.A., Kizhuk A.S., Rubanov V.G. Control of high power thermal object in the class of fractional order regulators // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016. Т. 8. №.4. С. 24790–24800.
5. Gol'tsov Yu. A., Kizhuk A. S., Rubanov V. G. Nonlinear phenomena in a high–power heating unit with pulse modulated control. MATEC Web of Conferences (Int. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017). 129, 03031. 2017.
6. Пат. № 2612311 Российская Федерация, МПК G05D 23/22. Устройство регулирования температуры электронагрева / Гольцов Ю. А., Жусубалиев Ж. Т., Кижук А. С., Коленченко В. В., Рубанов В. Г., заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г.Шухова. – № 2016113209, заявл. 06.04.2016, опубл. 06.03.2017, Бюл, № 7. – 5 с.
7. «Сегнетикс» контроллеры для систем автоматизации. URL: [http://segnetics.com/smh\\_2010/](http://segnetics.com/smh_2010/) (дата обращения: 25.05.2018).
8. Мощный полевой транзистор IRF3205. Техническая документация. URL: [www.irf.com](http://www.irf.com) (дата обращения: 25.06.2018).
9. Gol'tsov Yu. A., Kizhuk A. S., Rubanov V. G. Quasi-periodic dynamics in a system with multilevel pulse modulated control. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 MEACS2017 IOP: Materials Science and Engineering 327 (2018) 052014.
10. Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г., Яночкина О.О. Бифуркационные явления в мощной нагревательной технологической установке с многозонным импульсным управлением // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. Т. 15. № 5. С. 62-67.
11. Гольцов Ю. А., Кижук А. С., Рубанов В. Г. Нелинейные явления в широтно-импульсной системе управления теплотехническим объектом. Белгород: Вестник БГТУ. 2017. №9. С.188-192.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий, цифрового производства

---

<i>Белов В.Д.</i> Моделирование процедур процесса формирования типовых программ диагностики котельного оборудования.....	3
<i>Кузьмин В.А.</i> Алгоритмическое и программное обеспечение расчета строительных ограждений, содержащих отражательную изоляцию.....	8
<i>Маишунин Ю.К.</i> Оптимальное проектирование во взаимосвязи техническая система (ТС) – Материалы (Практика. Моделирование ТС).....	15
<i>Лещенко С.Л., Попов Д.В., Непомнящий Д.О.</i> Математическая модель трассы лидара.....	21

### Математические методы и интеллектуальные системы в робототехнике и мехатронике

---

<i>Ковалёв Д.А., Юдин Д.А.</i> Распознавание сигналов секций светофора на основе анализа цветовых пятен на изображении .....	25
<i>Бажанов А.Г., Бушуев Д.А., Пикалов А.С., Алексеевский С.В.</i> Моделирование сенсорной подсистемы автоматически управляемого транспортного средства для складских систем .....	30
<i>Порхало В.А., Рубанов В.Г., Костин С.В.</i> Моделирование системы управления перемещением роботизированной платформы с применением ADAMS и MATLAB .....	36
<i>Пушкарев И.А., Пушкарева Т.А.</i> Исследование структуры и динамики зубчато-роликковой планетарной передачи.....	40
<i>Жвалецкий О.В.</i> Концептуальная модель математической обработки тензотрессограмм.....	44

### Математические методы в экономике и гуманитарных науках

---

<i>Калабин А.Л., Боброва Е.И.</i> Полярные индексы как оценка динамики состояния региона .....	51
<i>Калабин А.Л., Туляков А.В.</i> Программная система для анализа текстов.....	55
<i>Калабин А.Л.</i> Оценка связанности текста методами компьютерной лингвистики .....	59
<i>Федосеев А.А.</i> Технология когнитивного электронного учебника .....	64
<i>Капусто А.В., Крушевский Е.А., Кузнецова А.А., Хотомцева М.А.</i> Реализация принципа наглядности обучения в математике на основе современных средств передачи информации .....	68
<i>Агаджанян А.Г.</i> Оптимальная тоновая аппроксимация монохромных изображений двухэтапным гибридным алгоритмом .....	73
<i>Сасин Е.А., Сидорович А.С.</i> Применение методологии AGILE и игрофикации в высшем образовании .....	78
<i>Сидорович А.С., Сасин Е.А.</i> Сравнительная характеристика основных метрик расстояний .....	82

### Обсуждение квалификационных работ

---

<i>Мазур А.А., Большаков А.А.</i> Математическое обеспечение для учёта трения на энергетические затраты промышленного манипулятора с вращательными движениями .....	85
---	----

### ШМУ-2 Информатизация технических систем и процессов

---

<i>Анашкин И.П., Казанцев С.В.</i> Моделирование ректификации методом Монте-Карло .....	88
<i>Гольцов Ю.А., Кижук А.С., Рубанов В.Г.</i> Энергоэффективное нагревательное устройство высокой мощности .....	91









*Научное издание*

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

**СБОРНИК ТРУДОВ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Том 8

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции  
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — научная и производственная литература

---

Подписано в печать \_\_.\_\_.2018. Формат 60х84/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л.10,0. Тираж 150. Заказ 15599б.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного редколлегией,  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.